

**METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN 2D DE MODELOS
HIDROMORFOLÓGICOS CON ALTA VARIABILIDAD MORFOLÓGICA
CASO DE ESTUDIO: RÍO META, COLOMBIA**

ING. GUILLERMO JESÚS ACUÑA ROBLES



**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DEL NORTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN RECURSOS HÍDRICOS
BARRANQUILLA
2015**

**METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN 2D DE MODELOS
HIDROMORFOLÓGICOS CON ALTA VARIABILIDAD MORFOLÓGICA
CASO DE ESTUDIO: RÍO META, COLOMBIA**

GUILLERMO ACUÑA ROBLES, I.C.

**TRABAJO DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN RECURSOS HÍDRICOS**

DIRECTOR: HUMBERTO ÁVILA, PHD



**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA - COLOMBIA
2015**

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

BARRANQUILLA, 2015

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVO ESPECIFICO	3
2 JUSTIFICACIÓN	4
3 ALCANCES Y LIMITACIONES	6
3.1 ALCANCES	6
3.2 LIMITACIONES	6
4 MARCO TEÓRICO	7
4.1 MODELOS HIDRÁULICOS	7
4.2 MIKE 21C: MODELO HIDRODINÁMICO, SEDIMENTOLÓGICO Y MORFOLÓGICO 2D	9
4.2.1 Malla Curvilínea Ortogonal	9
4.2.2 Componente Hidrodinámico	11
4.2.3 Componente Sedimentológico	13
4.2.4 Componente Morfológico	16
4.3 MÉTODOS DE CALIBRACIÓN	19
4.4 PARÁMETROS E INDICADORES USUALES DE CALIBRACIÓN	20
5 METODOLOGÍA	22
5.1 DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA SIMPLIFICACIÓN DE PARÁMETROS SELECCIONADAS	22
5.2 DEFINICIÓN DE INDICADORES DE CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA, SEDIMENTOLÓGICA Y MORFOLÓGICA	22
5.3 PROPUESTA DEL DISEÑO DE EXPERIMENTAL	23
5.4 ESTRUCTURACIÓN DE LA PROPUESTA DE FLUJOGRAMA	23
5.5 EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DE ESTUDIO: RIO META, COLOMBIA	23
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24

6.1	IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	24
6.2	DEFINICIÓN VARIABLES DE ANÁLISIS E INDICADORES DE CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA, SEDIMENTOLÓGICA Y MORFOLÓGICA.	25
6.3	DEFINICIÓN DE INDICADORES DE CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA, SEDIMENTOLÓGICA Y MORFOLÓGICA.....	26
6.3.1	Indicadores Cuantitativos	26
6.3.2	Indicadores Cualitativos.....	28
6.3.3	Indicador de Ajuste por componente y Global	29
6.4	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	30
6.5	PROCESO DE CALIBRACIÓN	31
6.6	EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DE ESTUDIO: RÍO META, COLOMBIA.....	33
6.6.1	Área De Estudio.....	33
6.6.2	Condiciones de Frontera de Frontera para Modelación 2D del Río Meta	36
6.6.3	Definición de Indicadores para Modelo del Río Meta	39
6.6.4	Selección y Simplificaron de Parámetros para Calibración del Modelo de Río Meta.....	43
6.6.5	Proceso de Calibración del Modelo del Río Meta	47
7	CONCLUSIONES	67
8	BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4—1. Esquematización comparativa del montaje de un río utilizando las mallas ortogonal y curvilínea.	10
Figura 4—2. Simulación de tres escenarios en el río Drue, Austria.	13
Figura 6—1 Flujograma.....	32
Figura 6—2 Sector representativo K235 - K310.....	35
Figura 6—3 Malla Tipo 2 sector representativo K235 - K310 de 1074x64	36
Figura 6—4 Condiciones de frontera para la validación hidrodinámica del modelo 2D.....	37
Figura 6—5 Curva HQ a partir del Modelo1D para el K235	38
Figura 6—6 Condición de Frontera de Caudal para el modelo 2D en K235	38
Figura 6—7 Ubicación de las islas consideradas para el análisis de distribución de caudales.....	39
Figura 6—8 Ubicación de aforos ADCP dentro del sector representativo	40
Figura 6—9 Sección Transversal aforos ADCP dentro del sector representativo	40
Figura 6—10 Transporte en suspensión de material de lecho en Estaciones Aceitico IDEAM (K127) y Aguaverde IDEAM (K360).....	41
Figura 6—11 Hidrograma de la estación IDEAM Aceitico (K127) entre 1999-2000.	44
Figura 6—12 Imágenes satelitales del sector representativo de K310-K235 entre 1999-2000	45
Figura 6—13 Comparación de Niveles de Agua simulados y Observados en Calibración Hidrodinámica.....	47
Figura 6—14 Comparación de Vectores de Velocidad en la calibración Hidrodinámica	49
Figura 6—15 Grafica de Probabilidad Normal de Efectos para IPA-MF en diseño experimental 2 ^k	51
Figura 6—16 Grafico de Probabilidad Normal de los Residuos -Experimento 2k	53
Figura 6—17 Grafico de Residuos Vs. Orden de Ejecución para experimento 2 ^k	53
Figura 6—18 Grafico de Residuos Vs. Predicciones para experimento 2k	54
Figura 6—19 Grafica de Probabilidad Normal de los Residuos diseño experimental 3k.....	57
Figura 6—20 Grafica de Residuos Vs. Orden de Ejecución para diseño experimental 3k.....	58
Figura 6—21 Grafico de Residuos Vs. Predicciones para experimento 3k	58
Figura 6—22 Comparación estadística de las Medias para el facto: Ecuación de Transporte.....	59

Figura 6—23 Comparación estadística de las Medias para el facto: P Carga Suspendida	59
Figura 6—24 Comparación estadística de las Medias para el facto: P Carga Arrastre	60
Figura 6—25 Comparación estadística de las Medias para las interacciones Ecuación Transporte y P carga Suspendida (ks)	60
Figura 6—26 Comparación estadística de las Medias para las interacciones Ecuación Transporte y P carga Arrastre (kb)	61
Figura 6—27 Comparación estadística de las Medias para las interacciones P carga Arrastre (kb) y P carga Suspendida (ks).....	62
Figura 6—28 Comparación de los Vectores de Velocidad para el caso seleccionado	63
Figura 6—29 Mapa de profundidades para después de 3 semanas de simulación	64
Figura 6—30 Mapa de profundidades para después de 31 semanas de simulación	64
Figura 6—31 Mapa de profundidades para después de 70 semanas de simulación	65
Figura 6—32 Mapa de niveles del lecho después de 35 Semanas de simulación	65
Figura 6—33 Mapa de niveles del lecho después de 71 Semanas de simulación	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Valores Típicos de Coeficientes de Resistencia.....	12
Tabla 6-1 Parámetros de Calibración	24
Tabla 6-2 Indicadores por Componente	29
Tabla 6-3 Distribución de caudales en islas del sector representativo. Caudales medidos en Campaña I	40
Tabla 6-4 Distribución de Caudales en escenarios de calibración Hidrodinámica	48
Tabla 6-5 Coeficientes de Determinación para la Calibración Hidrodinámica	48
Tabla 6-6 Factores (Parámetros del Modelo) de Diseño Experimental 2 ^k	50
Tabla 6-7 Resultados para cada condición Experimental – Experimento 2 ^k	50
Tabla 6-8 Tabla ANOVA - Experimento 2 ^k	52
Tabla 6-9 Factores (Parámetros del Modelo) de experimentacion del diseño 3 ^k ..	55
Tabla 6-10 Resultado de Experimento 3 ^k	55
Tabla 6-11 Tabla ANOVA experimento 3 ^k	56

INTRODUCCIÓN

En últimas décadas la Ingeniería de Recursos Hídricos ha incrementado su interés en el estudio del comportamiento los sistemas hídricos implementando modelos numéricos. Su gran rapidez, facilidad de manipulación y menor costo con respecto a los modelos físicos los ha hecho una alternativa muy atractiva. No obstante, la confiabilidad y precisión de los fenómenos recreados dependerán en gran medida de los ajustes adquiridos durante la calibración y validación.

En la práctica general, la calibración de los modelos fluviales consiste en un ajuste individual y secuencial los componentes hidrodinámico, sedimentológico y morfológico, pero en ríos donde la morfología es altamente sensible a las variaciones hidrológicas, esta metodología deja de ser eficaz, pues la interacción entre los componentes no permite obtener calibrar estos componentes de forma aislada. Es así que esta investigación planteó una metodología de calibración enfocada al manejo eficiente de los parámetros dentro de modelos numéricos fluviales 2D en escenarios en donde la morfología del cauce es altamente sensible al comportamiento hidrológico. Esta metodología contempla la interacción entre los diferentes componentes, logra el ajuste en el menor tiempo y con una menor exigencia computacional.

Entre los parámetros más relevantes para la calibración de modelos con la tipología de ríos en cuestión estuvieron: la rugosidad, la viscosidad turbulenta, la ecuación de transporte de sedimentos, los coeficientes de carga de sedimentos en suspensión y de carga de arrastre de lecho, la intensidad del flujo helicoidal, la pendiente longitudinal y transversal del lecho y los coeficientes de erosión de orillas.

Para determinar el nivel de ajuste dentro de los procesos de calibración proporcionados por la variación de los parámetros, se establecieron indicadores tales como coeficientes de determinación entre los valores medidos y simulados de: las series de los niveles de agua y caudales, las profundidades, los valores de velocidad (magnitud y dirección), los niveles del lecho, los nivel del lecho del Thalweg; e indicadores de visuales, para corroborar la evolución adecuada de los procesos morfológicos y la similitud en las tasas de transporte de sedimento en suspensión con respecto a las series históricas.

La metodología propuesta fue corroborada aplicada en un sector de 75Km del río Meta en Colombia, ubicado entre las abscisas K235 (6°6'18.81"N / 69°12'55.04"O) y K310 (6°2'50.38"N / 69°44'40.11"O); su selección estuvo basada en las

condiciones hidráulicas y sedimentológica y morfológicas que lo hacían representativo para el resto del cauce. Se utilizó MIKE-21C como software de modelación 2D y su elección se basó en su capacidad de analizar la variación espacial y temporal de la profundidad, nivel del lecho, variación de nivel de lecho, velocidad y esfuerzo cortante, durante intervalos de tiempo extendido (DHI, 2011).

La metodología propuesta se considera un gran avance dentro de las actuales herramientas para la calibración de modelos hidrodinámicos también y no se descarta que puede ser aplicada modelos hidromorfológicos fluviales 2D bajo en diferentes escenarios.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para la calibración de modelos numéricos fluviales 2D asociados a ríos con hidrodinámica altamente sensible al comportamiento hidrológico y morfológico.

1.2 OBJETIVO ESPECIFICO

- Definir criterios de selección inicial de variables relevantes de las condiciones hidrodinámicas, sedimentológicas y morfológicas dentro dominio espacial del modelo fluvial 2D.
- Formular un procedimiento secuencial e iterativo de calibración de parámetros hidrodinámicos, sedimentológicos y morfológicos en modelos fluviales 2D.
- Establecer indicadores de ajuste en el proceso de calibración hidrodinámica, sedimentológica y morfológica del modelo fluvial 2D.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros de calibración hidrodinámica, sedimentológica y morfológica en ríos con alta variabilidad morfológica.

2 JUSTIFICACIÓN

La modelación computacional se levanta como una herramienta accesible, rápida, eficaz y económica para la investigación en ríos y demás cuerpos de agua. Sin embargo, dadas las particularidades que cada hidrosistema posee aún tópicos por profundizar.

Actualmente hay pocas guías metodológicas o lineamientos de calibración estructurados para la calibración de modelos fluviales 2D de ríos donde la alta interdependencia entre sus componentes no permite la calibración de estos de forma lineal e individual. Las estrategias de calibración utilizadas por los consultores e investigadores para estos tipos de ríos, están fundamentadas en recomendaciones dadas por los desarrolladores del software utilizado y/o usuarios con mayor experiencia. Estas recomendaciones no representan una estructura metodológica replicable a otros ríos.

Esta investigación planteó una metodología de calibración estructurada, replicable, sencilla y eficiente aplicable a los ríos en consideración; enfocándose en aquellos cuya condición hidrodinámica es dependiente a las variaciones morfológicas generadas durante el tránsito de sus caudales. Es decir, ríos en donde el nivel de lecho, las formas de fondo y la pendiente longitudinal y transversal pueden tan intensamente que el comportamiento hidrodinámico del cauce para cada periodo (máximos y mínimos anuales) puede ser totalmente diferente.

La adecuada calibración de un río con esta tipología permite un estudio del mismo con un mayor nivel de confiabilidad lo cual es fundamental para el desarrollo de nuevos conocimientos, pronósticos más veraces y análisis variados.

La investigación desarrollada fue puesta a prueba sobre un sector representativo de 75Km del río Meta (Colombia) el cual posee la tipología fluvial en consideración, lo que permitió corroborar su validez y relevancia. Los avances realizados en la definición de esta metodología de calibración podrían servir para la calibración de otras tipologías e incluso el desarrollo de otras metodologías de calibración.

Este proyecto de investigación se planteó como parte de las líneas de investigación “Ingeniería Fluvial y Costera” y “Modelación y Simulación Computacional de Problemas de Ingeniería” de la Universidad del Norte; y fue respaldado por la experiencia, el equipamiento e información que el Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales (IDEHA) ha logrado adquirir por durante 27

años de trabajo en el tema de Modelación Hidráulica Fluvial de los ríos grandes ríos de Colombia tales como el Magdalena, Cauca y Meta.

3 ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 ALCANCES

Se presentará una guía metodológica para la calibración de modelos hidromorfológicos 2D con alta dependencia entre los componentes hidrodinámicos, sedimentológicos y morfológicos, dentro de la cual se establecerán: criterios generales relacionados con el manejo eficiente de parámetros; e indicadores de ajuste del proceso. Para la evaluación de la metodología se tomó el caso de estudio el río Meta debido a su alta variabilidad hidrológica y características sedimentológicas y morfológicas; posee una hidrodinámica altamente dependiente a las condiciones morfológicas.

3.2 LIMITACIONES

- La definición y simplificación de los parámetros está basada en el manejo de parámetros de calibración del MIKE 21C.
- La modelación numérica 2D se realizará para un sector de 75Km de longitud sobre el río Meta.
- Los indicadores aplicados al área de estudio están sujetos a la disponibilidad de información que posee la Universidad del Norte

4 MARCO TEÓRICO

Durante esta sección se definieron las principales teorías y conceptos utilizados durante el desarrollo del proyecto de investigación. Se realizó profundización especial en las características y parámetros de calibración definidos en MIKE-21C, debido fue el utilizada para poner la práctica la metodología desarrollada.

4.1 MODELOS HIDRÁULICOS

Los modelos hidráulicos fluviales son representaciones físicas o numéricas utilizadas para recrear y evaluar las respuestas hidrodinámica, sedimentológica, morfológica y ambiental de un cuerpo de agua. Los modelos pueden simular o modelar escenarios asociados a fenómenos naturales, actividades antropogénicas e implementación de obras hidráulicas (Ettema, Arndt, Roberts, & Wahl, 2000). Con los avances tecnológicos producidos en las últimas décadas, los modelos numéricos han alcanzado un mayor auge, esto debido a que lograron reducir los tiempos de cálculo, incrementar la precisión y control sobre los escenarios, aumentaron la facilidad de operación e interpretación de datos, disminuyeron los costos (respecto a los modelos físicos) y extendieron la disponibilidad y variedad de sus utilidades (Olsen, 2012).

Los modelos matemáticos fluviales usualmente están desarrollados con base en las ecuaciones de Navier-Stokes las cuales describen el comportamiento de un fluido viscoso. Estas ecuaciones fueron posibles gracias a los aportes de Jean-Claud Barré de Saint -Venant (1827-1886), Louis Marie Henri Navier (1785-1836), Baron Augustin Louis de Cauchy (1789-1857), Simeon Denis Poisson (1781-1840) and George Gabriel Stokes (1819-1913). La resolución estas ecuaciones diferenciales parciales, es muy compleja en su forma analítica o en algunos casos imposibles. De allí que la gran mayoría los modelos matemáticos contemporáneos trabajan con métodos asociados a diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos; siendo el primero uno de los métodos más populares. En estos métodos, el dominio del flujo está dividido en incrementos espaciales discretos y se utilizan técnicas iterativas para la convergencia del sistema. De allí que la precisión de los resultados del modelo en un área determinada estará influenciada por la subdivisión espacial utilizada para la resolución del mismo (Weiming , 2008; Olsen, 2012).

Estas ecuaciones pueden estar programadas de forma conservativa en donde la derivada del flujo esta expresada en los términos del caudal o el flujo másico y el

área de la sección transversal; o en forma no conservativa donde las derivadas están expresadas en términos de la velocidad y la profundidad. Aunque ha sido reportado por algunos autores que la estabilidad se incrementa cuando los métodos de resolución trabajan con la forma conservativa de las ecuaciones, cabe aclarar que esto por sí mismo no es garantía que la solución será más estable o exacta (Shafiquil Islam, 2009).

La hidrodinámica de ríos está caracterizada por complejos patrones de flujo tridimensional, que deben ser tenidos en cuenta cuando se está estudiando sus cambios morfológicos. No obstante, la demanda computacional necesaria para ejecutar estos cálculos en evaluaciones de unidades de tiempo grandes, puede ser inviable. Se han planteado simplificaciones para reducir el sistema de ecuaciones de continuidad y momentum un problema bidimensional.

Una de esas simplificaciones más conocida es el método de profundidad promedio o profundidad-integrada, el cuál es el método de simplificación más usado para la descripción de los sistemas de ríos con variaciones morfológicas significativas (Julien, 2002). Este método de análisis de flujos verticalmente homogéneos permite reducir la dimensionalidad de las ecuaciones (DHI, 2004). Las ecuaciones de continuidad y momentum para un sistema ortogonal el método de la profundidad-promedio expresadas en su forma conservativa están dadas como:

- Ecuación de Continuidad

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

- Ecuación de momentum en X

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{C^2 h^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0$$

- Ecuación de momentum en Y

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{gQ\sqrt{P^2 + Q^2}}{C^2 h^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0$$

Donde:

- t= tiempo
- x, y – Sistema de Coordenadas Cartesianas
- H(x,y)-posición del nivel de agua relacionado a nivel de referencia (m)

- P- Flujo másico en dirección x dado por $P=UH$ ($m^3/s/m$)
- Q- Flujo másico en dirección y dado por $P=VH$ ($m^3/s/m$)
- U y V- Componente de Velocidad asociada a la Profundidad-promedio en dirección X y Y respectivamente (m/s)
- h, la profundidad de flujo(m)
- g, la aceleración de la gravedad (m/s^2)
- C-Coeficiente de resistencia de Chezy
- E- Coeficiente de viscosidad turbulenta

4.2 MIKE 21C: MODELO HIDRODINÁMICO, SEDIMENTOLÓGICO Y MORFOLÓGICO 2D

El MIKE-21C es un programa desarrollado por el Danish Hydraulics Institute (DHI) como un sistema de modelación matemática para la simulación hidrodinámica, sedimentológica y morfológica de ríos. MIKE-21C ha sido ampliamente utilizado en la evaluación y diseño de sistemas de protección de orillas; optimización y diseño de canales de navegación fluvial; evaluación del impacto generado por obras de ingeniería (puentes, canalizaciones y demás estructuras hidráulicas); pronóstico de sedimentación para estructuras captación, zonas portuarias y represas; y optimización de planes de restauración de ecológica de planicies de inundación (DHI, 2011) .

4.2.1 Malla Curvilínea Ortogonal

En muchos problemas de ingeniería el cuerpo de agua posee un dominio movable e irregular y los métodos de diferencias finitas con mallas regulares pueden llegar a tener problemas para recrear tales condiciones de borde. Para estos casos en las últimas décadas los modelos de diferencias finitas se han reajustado y transformado para establecer un sistema de coordenadas curvilíneo que permita establecer y proveer mayor resolución a los bordes (Weiming , 2008). En la Figura 4—1 se presenta una esquematización comparativa del montaje de un río utilizando las mallas ortogonal y curvilínea.

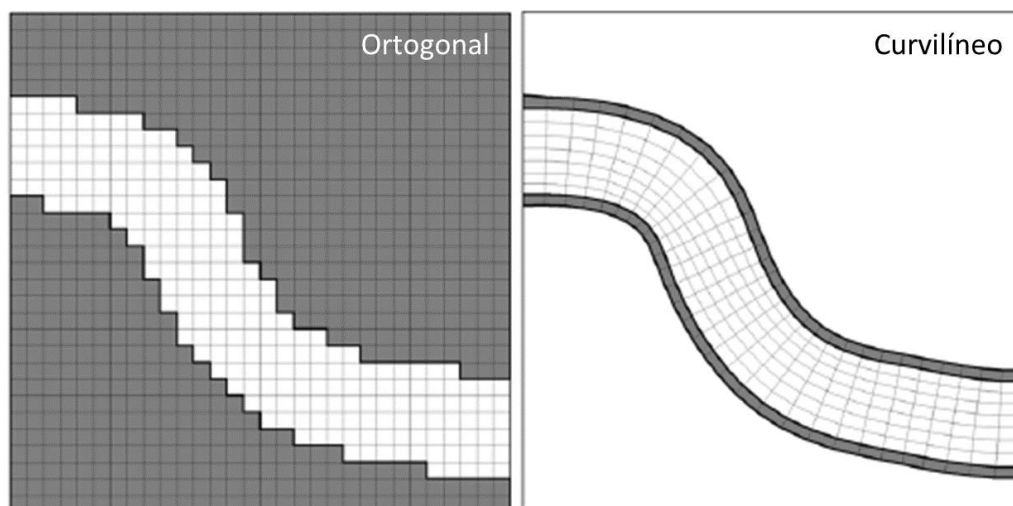


Figura 4—1. Esquemización comparativa del montaje de un río utilizando las mallas ortogonal y curvilínea.

Fuente: (DHI, 2004)

MIKE 21C es un modelo que trabaja a partir de una malla curvilínea ortogonal que permite recrear las curvaturas propias de los cauces fluviales (DHI, 2004). No obstante, para desarrollar el modelo de diferencias en esta malla curvilínea las ecuaciones de gobierno sufren algunas transformaciones importantes de la siguiente manera:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial q}{\partial n} - \frac{q}{Rs} + \frac{p}{Rn} = 0$$

- Ecuación de momentum en s

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{pq}{h} \right) + 2 \frac{pq}{hR_n} + \frac{p^2 - q^2}{hR_s} + gh \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{g}{C^2} \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} = 0$$

- Ecuación de momentum en n

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{q^2}{h} \right) + 2 \frac{pq}{hR_n} + \frac{q^2 - p^2}{hR_s} + gh \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{g}{C^2} \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} = 0$$

Donde

- t= tiempo
- s, n – sistema de Curvilíneo de Coordenadas
- p,q flujo de masa en dirección “s” y “n” respectivamente.
- H-position del nivel de agua relacionado a nivel de referencia (m)
- h, la profundidad de flujo (m)
- g, la aceleración de la gravedad (m/s²)
- C-coeficiente de resistencia de Chezy.

- R_s, R_n – radios de curvatura de las líneas S y n respectivamente.

Las simulaciones en MIKE-21C pueden considerar los componentes hidrodinámicos, sedimentológicos y morfológicos en busca de una retroalimentación acerca de cambios en resistencia hidráulica, topografía del lecho y variaciones de las orillas (DHI, 2011).

Con el fin de entender el funcionamiento y relevancia, a continuación se hará una breve descripción de cada uno de estos junto con sus variables de interés:

4.2.2 Componente Hidrodinámico

El componente hidrodinámico simula las variaciones del nivel del agua y caudal en ríos y estuarios. Su base son las ecuaciones de gobierno de continuidad y momentum anteriormente descritas. La calibración del componente hidrodinámico usualmente consiste en el ajuste del coeficiente de rugosidad y la viscosidad turbulenta para que el modelo pueda recrear los niveles, caudales, profundidades y velocidades medidas.

- **El coeficiente de rugosidad (Chezy o Manning):** Este parámetro tiene una directa relación con los niveles de agua y velocidad. En muchos casos el coeficiente de rugosidad se asume como una constante a lo largo del cauce en modelación, pero en los casos en donde la morfología e hidrología es muy variable, los cambios morfológicos en lecho generarían variaciones considerables en la rugosidad y no es recomendable utilizar un valor constante. MIKE-21C permite utilizar un coeficiente de rugosidad como una simple función de la profundidad:

$$C = A \cdot h^b$$

Donde A y b son coeficientes y exponentes de resistencia calibrables de acuerdo con el caso de estudio.

La aplicación de una rugosidad variable en la simulación, afectara los patrones de erosión y sedimentación del cauce. La actualización de la rugosidad ocasionara que las líneas de corrientes sean desviadas hacia las zonas poco profundas y el transporte de sedimentos se incremente debido al aumento de los esfuerzos cortantes en el lecho (Talmon, 1992).

El empleo de un coeficiente de rugosidad variable, debe estar acompañado por una definición en el modelo de los límites mínimos y máximos de dicho

coeficiente. Nótese, que el coeficiente de Chezy en ríos normalmente es menor a $90 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, véase también la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Valores Típicos de Coeficientes de Resistencia

Tipo de Frontera	Chezy $C(\text{m}^{1/2}/\text{s})$
Liso	118
Lecho en Arena Lisa	100-130
Antidunas de arena	72-100
Ondas	43-72
Dunas de Arena	32-65
Lecho de Grava	43-86
Lecho de Guijarro	37-65
Lecho de Roca	32-52
Vegetación	18-43

Fuente: (Julien, 2002)

- **El coeficiente de viscosidad turbulenta (Eddy Viscosity):** Este parámetro está asociado a la calibración de los vectores de velocidad del cauce y depende fuertemente del estado de turbulencia del cauce el cual está asociado sus valores promedios de velocidad vertical, los que a su vez pueden variar a lo largo entre los puntos de una misma sección transversal. Este parámetro debe ser calibrado por medio de ensayo y error; y usualmente se encuentra entre $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ y $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$.

La Figura 4—2 se muestra la variación de los vectores de velocidad por la aplicación de diferentes coeficientes de viscosidad turbulenta. Estos resultados corresponden a un caso de estudio en el río Drau en Austria en donde se calibro un modelo de flujo permanente utilizando MIKE-21C.

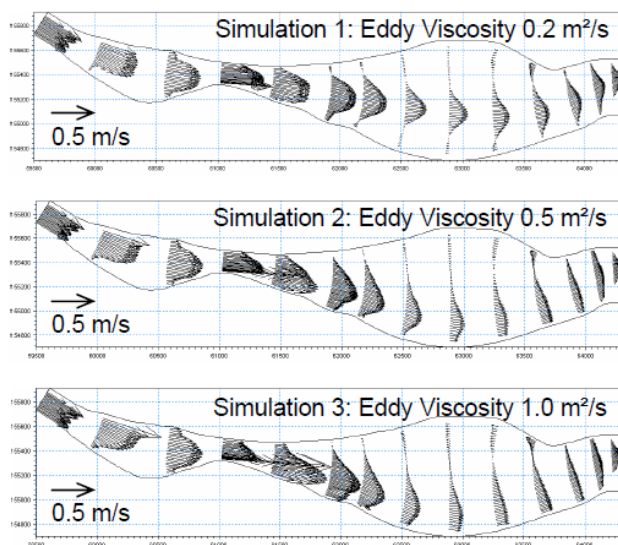


Figura 4—2. Simulación de tres escenarios en el río Drue, Austria.
Fuente: (Dorfmann & Knoblauch, 2008)

Cabe resaltar que en modelos fluviales en donde no hay contracciones o expansiones verticales u horizontales que aumenten el gradiente de velocidad, la viscosidad turbulenta puede no ser significativa.

4.2.3 Componente Sedimentológico

La calibración del componente sedimentológico consiste en determinar la ecuación de transporte y el factor de ajuste de transporte de sedimentos en suspensión (k_s) que permita establecer la proporción del transporte total que corresponde a transporte suspendido. Siendo este último uno de gran interés, para el desarrollo morfológico de ríos en donde los cambios morfológicos producidos por la hidrodinámica son relevantes.

- **Ecuación de Transporte:** La elección de la ecuación estará dada principalmente por la granulometría del material de fondo. Se puede utilizar algunas de las ecuaciones previamente desarrolladas como la de Yang para arena (1983), Yang para grava (1984), Engelund-Hansen (1967), Van Rijn (1967), Engelund and Fredsoe (1976), Meyer-Peter and Muller (1948), entre otras y/o ecuaciones empíricas que hayan sido establecidas para el río en estudio.

La ecuación de Yang (1973,1984) fue desarrollada de forma experimental a partir de canales aluviales, con tamaños sedimentos entre 0.062 y 7.0 mm, concentraciones sedimentos totales entre 10ppm y 585ppm; ancho entre los 0.13-530m, profundidades entre 0.01-15m, temperatura del agua entre el 0-

34°C, velocidades promedio de 0.23 a 1.97m/s y pendientes desde 0.000043 a 0.29. La ecuación de Yang para arenas y gravas se presenta a continuación:

Para arenas ($d_m < 2\text{mm}$)

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.457 \log \frac{u_\phi}{\omega} \\ + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.314 \log \frac{u_\phi}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right)$$

Para gravas ($d_m \geq 2\text{mm}$)

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 4.816 \log \frac{u_\phi}{\omega} \\ + \left(2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.282 \log \frac{u_\phi}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right)$$

El modelo de Engelund and Hansen (1967) es un modelo de transporte total que divide la carga de sedimento en carga de lecho y de carga en suspensión mediante la aplicación los factores de carga de lecho y carga en suspensión (DHI, 2005), como sigue:

$$S_{bl} = k_b S_{tl}$$

$$S_{sl} = k_s S_{tl}$$

Donde,

S_{bl} = Transporte de lecho, [m^2/s]

k_b = Factor de carga de lecho, [-]

S_{sl} =Transporte en suspensión, [m^2/s]

k_s =Factor de carga en suspensión, [-]

S_{tl} =Transporte total, [m^2/s]

La ecuación de transporte total se obtiene de la siguiente ecuación:

$$S_{tl} = 0.05 \frac{C^2}{g} \theta^{\frac{5}{2}} \sqrt{(s-1) g d_{50}^3}$$

Donde,

C = Coeficiente de Chezy, $[m^{0.5}/s]$
 g = aceleración de la gravedad, $[m/s^2]$
 θ = Parámetro de Shields, $[-]$
 s = densidad relativa del sedimento, $[-]$
 d_{50} = diámetro característico del sedimento, $[m]$

El modelo Van Rijn (1967) es un modelo de transporte total que divide la carga de sedimento en carga de lecho y de carga en suspensión mediante la aplicación los factores de carga de lecho y carga en suspensión (DHI, 2005), como sigue:

$$S_{bl} = k_b S_{tl}$$

$$S_{sl} = k_s S_{tl}$$

Donde,

S_{bl} = Transporte de lecho, $[m^2/s]$
 k_b = Factor de carga de lecho, $[-]$
 S_{sl} = Transporte en suspensión, $[m^2/s]$
 k_s = Factor de carga en suspensión, $[-]$
 S_{tl} = Transporte total, $[m^2/s]$

La ecuación de transporte total se obtiene de la siguiente ecuación:

$$S_{bl} = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \sqrt{(s-1) g d_{50}^3}$$

Donde,

T = parámetro adimensional que relaciona las velocidades de fricción.
 D_* = parámetro adimensional de la partícula
 g = aceleración de la gravedad, $[m/s^2]$
 s = densidad relativa del sedimento, $[-]$
 d_{50} = diámetro característico del sedimento, $[m]$

Algunas de las formulas mencionadas solo predicen la carga total (carga de lecho carga suspendida), dejando de lado información acerca de la carga de lecho y la carga suspendida que puede ser requerida. De allí, que las fórmulas utilizadas por MIKE-21C incluyen los factores de calibración k_b y

k_s para carga de lecho y carga en suspensión, respectivamente, en orden de diferenciar entre los dos modelos de transporte.

Por otra parte, debe aclararse que la carga en suspensión aquí mencionada no contiene la carga de lavado, pues el cálculo y simulación de esta no es relevante para la mayoría de modelos 2D. En muchos de los casos el porcentaje de carga de lavado de la carga en suspensión suele estar entre 70% y 90% del transporte en suspensión medido.

- **Coefficiente de ajuste de transporte en suspensión (k_s):** Este coeficiente usualmente está en el orden de 0.1-0.9. Y como ya se mencionó con anterioridad busca establecer una proporción del entre el transporte de sedimentos en suspensión y el transporte total.

4.2.4 Componente Morfológico

La calibración morfológica consiste en la estimación de los parámetros incidentes en los procesos de erosión/sedimentación de lecho y orillas. La calibración de este componente es de gran complejidad debido al número de variables que requieren ser ajustadas y la interacción de éstas con la hidrodinámica y el transporte de sedimento del río.

En la calibración de este componente se debe considerar una vez más se ponen en atención el efecto del transporte de sedimentos, la pendiente transversal y longitudinal del lecho; y los coeficientes asociados a la tasa de erosión de orillas.

- **Coefficiente de ajuste de transporte de lecho (k_b):** Este coeficiente representa la proporción del transporte de sedimentos total que corresponde al transporte de lecho (material de arrastre). Este parámetro oscila entre 0.1-0.5; a mayor es este valor mayor más intensos son los procesos de erosión, sedimentación y consecuentemente el desarrollo de formas de lecho.
- **Coefficiente de ajuste de transporte de suspensión (k_s):** Este coeficiente usualmente está en el orden de 0.1-0.9. Y como ya se mencionó con anterioridad busca establecer una proporción del entre el transporte de sedimentos en suspensión y el transporte total

Por otra parte, el transporte de sedimentos sobre la sección transversal es un proceso esencial para el desarrollo del lecho y por efecto uno de los elementos de ajuste más importantes dentro de la morfología. El transporte de sedimentos a lo largo de una línea de flujo está dado por:

$$S_n = (\tan \delta_s - G \theta^{-a} \frac{\partial z^*}{\partial s}) S_{bl}$$

Donde

δ_s es la intensidad del flujo helicoidal (calculado del modelo advección dispersión)

θ Es el parámetro de Shield

S_{bl} = Transporte de lecho, [m²/s]

G y a son parámetros de calibración

- **Coeficiente de pendiente transversal (G):** Este coeficiente se calibra a prueba y error. Pruebas de laboratorio realizadas por Talmon sugieren que este coeficiente puede diferir en su valor de acuerdo al caso de estudio. Para valores altos de G, la topografía del fondo tiende a estabilizarse a sí misma; y para valores pequeños de G, la topografía es más inestable.
- **Exponente de pendiente transversal (a):** Al igual que el parámetro anterior, su calibración es por interacción. Los valores usuales de este exponente están 0.5 y 1.0. El valor de “a” tiene un efecto similar al del valor G pero en una proporción menos pronunciada.

Entre los valores experimentales obtenidos para G y a se encuentran:

- Englund-Fredsoe: G=0.625, a =0.5
 - Kikkawa: G=0.6
 - Bendegoni: G=0.667, a =1
 - Struiksma: G=0.588, a =0.5 o G=1.176, a =0.5.
-
- **Flujo Helicoidal:** La intensidad del flujo helicoidal está definido como la desviación de $\tan(\delta)$ del esfuerzo cortante en el lecho debido a las corrientes secundarias producidas en las curvas de los ríos. Usualmente se toma un valor constante de 1, pero de acuerdo con el caso este puede estar en un rango de 0.4 y 1.2.

➤ Tasa de Erosión de Orillas

La calibración de la morfología de las orillas está relacionada directamente los procesos de erosión en los márgenes del cauce. En MIKE-21C la erosión de las orillas está dado por:

$$Eb = -\alpha \cdot \frac{dz}{dt} + \beta \frac{s}{h} + \gamma$$

Donde

Eb = Tasa de erosión en m/s.

z = Nivel de lecho

s = Transporte de sedimentos cerca de la orilla.

h = Nivel de agua

α, β, γ = Coeficientes de calibración especificados en el modelo.

La dependencia de la pendiente cerca de la orilla está incluida en el primer término, el cual está basado en el supuesto de que la forma transversal de perfil de lecho no cambia. Por lo tanto, se mantiene la consideración de que la tasa de erosión de las orillas es proporcional a la erosión del lecho. El coeficiente α corresponde a la pendiente transversal en la orilla. La pendiente transversal de lecho en ríos naturales esta típicamente en el orden de 5-20 a lo largo de las orillas erosionables.

La dependencia del esfuerzo cortante ejercido por las corrientes de flujo sobre la orilla está incluida en el segundo término. Este término es derivado de la consideración que el material erosivo, E_b , es movido aguas abajo por el flujo determinado por la tasa de transporte de sedimento S o al menos una fracción β de este. Esto significa que el coeficiente β puede ser escogido en el rango de 0-1. Cabe aclarar, que en este caso que el material de la orilla tiene la misma granulometría que del lecho

El último término, γ , representa una constante de erosión la cual es independiente de las condiciones hidráulicas, la cual puede ser utilizada cuando no hay evidencia de una relación dz/dt S . Esta constante puede ser calculada a partir de registros históricos de las orillas o de imágenes satelitales.

4.3 MÉTODOS DE CALIBRACIÓN

Los modelos 2D han permitido el estudio de una gran cantidad de fenómenos y escenarios útiles dentro del área de la investigación y consultoría. No obstante, es de vital importancia los procesos de calibración del modelo para dar fiabilidad a la toma de decisiones a partir de estos. Refsgaard y Henriksen (2004) definen la tarea de calibración como "el procedimiento de ajuste de los valores de los parámetros de un modelo para reproducir la respuesta de la realidad dentro del rango de exactitud especificado en los criterios de desempeño", en donde el criterio de desempeño es el " nivel de ajuste aceptable entre el modelo y la realidad".

Actualmente se han planteado diferentes metodologías para la calibración de los modelos 2D que tiene como enfoque optimizar el costo computacional y tiempo necesario para encontrar el mejor ajuste. En estas metodologías los parámetros pueden ser ajustados por medio de una optimización automática, diseños experimentales o por métodos de prueba y error.

Los algoritmos de optimización han sido ampliamente utilizados en los últimos 30 años a modelos 1D y se basan en una función objetivo que cuantifica la discrepancia entre las observaciones y los resultados numéricos; un algoritmo de optimización que ajusta los parámetros para reducir el valor de la función; y un criterio de convergencia que verifica su valor actual (por ejemplo, Wasantha Lal (1995) y Khatibi et al (1997)). No obstante, su uso puede verse limitado al quedar atrapados en óptimos locales que pueden no ser coherentes con el caso de estudio.

Actualmente la gran mayoría de software comercial para modelación 2D en la parte fluvial no posee algoritmos de optimización, pero no se descarta que no sea un tema en desarrollo. Algunos softwares de código abierto (Delft 3D, por ejemplo) permiten el desarrollo de esta opción en un futuro. Trabajos como el de Brière, Giardino, & Van der Werf (2010) se presentan como pioneros sobre de optimización numérica automática aplicados a modelos morfológicos costeros 2D en Delft3D. En esta experiencia los autores lograron calibrar el movimiento de una barra de arena encontrada en un perfil de playa (Egmond-aan-Zee) de las costas holandesas (véase Figura 4-1).

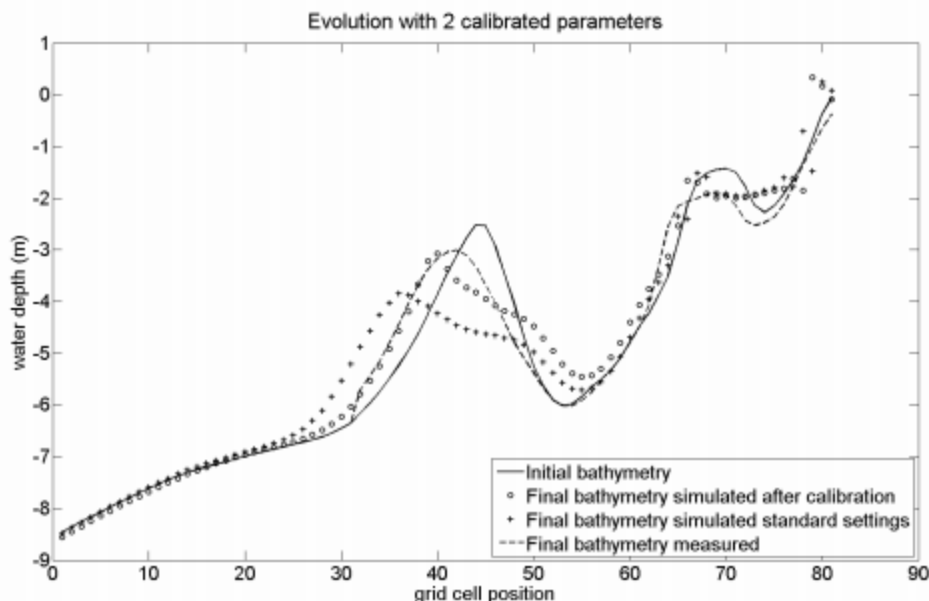


Figura 4-1 Perfil Transversal de Egmond-aan-Zee
Fuente: (Brière, Giardino, & Van der Werf, 2010)

Estos mismos autores, corroboraron la confiabilidad de su calibración aplicaron un experimento Twin para corroborar la optimización realizada al mismo caso de estudio del perfil costero descrito con anterioridad. Tomaron como variable de salida un coeficiente de determinación R^2 entre el nivel de lecho observado en el perfil simulado y el calculado. Los autores reconocieron la probabilidad de quedar atrapados en un óptimo local y la eficiencia de ambos métodos bajo un limitado número de parámetros de calibración.

Cabe resaltar que el ejemplo ahora descrito, aunque está orientado a la calibración de un modelo morfológico costero. No hay muchos ejemplos de aplicaciones de diseños experimentales para la calibración en el área fluvial.

4.4 PARÁMETROS E INDICADORES USUALES DE CALIBRACIÓN

En la gran mayoría de investigaciones la calibración centro sus esfuerzos en el componente hidrodinámico ajustando el coeficiente de rugosidad. Por ejemplo, Trigg et al (2009) realizaron un modelo de crecientes de inundación para el río Amazonas con el modelo LISFLOOD-FP en donde simulaban varios tramos del río en los cuales variaron los parámetros de Manning en incrementos de 0.001 entre 0.02 y 0.04 hasta lograr recrear los niveles de agua observados. Un procedimiento similar fue seguido por Remo, Khanal, & Pinter (2013) utilizando MIKE 21C.

Otra alternativa para la calibración hidrodinámica se observó en los trabajos de Van Griensven, y otros, (2013) en los cuales simularon el comportamiento de sedimentos del río Simiyu en Tanzania variando el coeficiente de rugosidad definido como una relación entre el radio hidráulico y un valor constante del coeficiente de Manning:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

Remo et al (2013) también verificaron la sensibilidad del coeficiente de viscosidad turbulenta (Eddy Viscosity) como un posible parámetro de calibración en MIKE21C. El parámetro de viscosidad turbulenta en MIKE21C representa la disipación de energía añadida debido a la turbulencia en el flujo del río (DHI, 2004). En la experiencia del Remo et al (2013) se varió este coeficiente entre $0.5\text{m}^2/\text{s}$ a $3.0\text{m}^2/\text{s}$

Los modelos 2D usados para la modelación del transporte de sedimentos consisten, en una solución numérica de una o más de las ecuaciones diferenciales de continuidad, cantidad de movimiento y la energía de fluido, junto con la ecuación diferencial para la continuidad de los sedimentos. La capacidad de simular los procesos de erosión y sedimentación de fondo, erosión y falla en las orillas, la formación de formas de lecho, erosión y deposición de material alrededor de estructuras, engrosamiento y clarificación de lecho y transporte de contaminantes adheridos a sedimentos hace de esta tipología de modelos altamente atractivos.

No obstante, la modelación del transporte de sedimentos es uno de los temas más difíciles de abordar. La limitada información para el montaje, calibración y validación del modelo es una de las principales barreras para modelar con precisión y exactitud el transporte de sedimentos. El reciente auge de la tecnología de sensores ADV y/o ADCP, se puede aliviar algunas limitaciones (Cormagdalena - Universidad del Norte, 2005) pues permite obtener informaciones de concentraciones en la sección transversal.

En este orden de ideas, algunos modeladores basan la calibración en la comparación de las tasas de transporte de sedimentos en suspensión y/o comparaciones de sección transversales y longitudinales conocidas. Los principales factores de ajuste son la ecuación de transporte de sedimentos y el porcentaje de transporte de sedimentos de fondo y suspendidos. Ejemplo de ellos son los trabajos realizados por Huthoff, Van Vuren, Barneveld, & Scheel (2010), Melman (2011); Adrichem (2013); y Alam & Matin, (2013).

5 METODOLOGÍA

La investigación desarrollada fue de tipo analítica y experimental. Se basó en un análisis conceptual de los parámetros utilizados dentro de los procesos de calibración de los componentes hidrodinámicos, sedimentológicos y morfológicos de los modelos fluviales 2D; y plateó un diseño experimental para determinar de forma eficiente los parámetros de calibración. Como validación de la metodología formulada, esta se aplicó al caso de estudio de un sector representativo del río Meta (Colombia).

Esta investigación se desarrolló en 5 secciones:

5.1 DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA SIMPLIFICACIÓN DE PARÁMETROS SELECCIONADAS.

Los parámetros de calibración entre los diferentes sistemas de modelación 2D pueden variar considerablemente dependiendo de las aproximaciones utilizadas por el sistema computacional, no obstante, algunos están ceñidos a las ecuaciones de gobierno y son esencialmente iguales para todos los casos.

Según el objetivo de la modelación, las características del tramo a modelar y la resolución del modelo, algunos de estos parámetros de entrada pueden dejar de ser relevantes y adoptar valores estándares. Una reducción de términos simplifica el proceso de calibración y reduce el tiempo en la misma.

5.2 DEFINICIÓN DE INDICADORES DE CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA, SEDIMENTOLÓGICA Y MORFOLÓGICA

Para establecer el grado de ajuste logrado en los procesos de calibración de los componentes hidrodinámicos, sedimentológicos y morfológicos y el modelo en general, se establecieron indicadores de ajustes. Estos, son valoraciones estadísticas (coeficiente de determinación) y/o visuales del grado de similitud entre el escenario simulado y el medido.

Los indicadores aquí presentados no representan una restricción dentro del proceso de valoración del modelo, de hecho, de contar con mayor información el proceso de verificación puede ser enriquecido con indicadores adicionales

5.3 PROPUESTA DEL DISEÑO DE EXPERIMENTAL

Se propuso un diseño experimental para la calibración de los parámetros dentro de los componentes. Los efectos de las variables y las interacciones se sintetizaron en un análisis de sensibilidad, el cual fue la base para la optimización del diseño.

5.4 ESTRUCTURACIÓN DE LA PROPUESTA DE FLUJOGRAMA

Se propuso un flujograma para la calibración, considerando los criterios y análisis previamente definidos. Este flujograma integra la definición de los parámetros de calibración, el uso de los indicadores y la aplicación del diseño de experimentos para obtener la calibración del modelo.

5.5 EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DE ESTUDIO: RIO META, COLOMBIA

Esta metodología fue aplicada en la calibración de un modelo bidimensional de 75Km del río Meta en Colombia ubicado entre las abscisas 6°6'18.81"N/69°12'55.04"O y 6°2'50.38"N/69°44'40.11"O). Dicha calibración fue realizada como parte de la ejecución del proyecto de “Actualización de los Estudios y Diseños para la Navegabilidad entre Cabuyaro (K804) y Puerto Carreño (K0)” realizado por la Universidad del Norte para el Instituto de Nacional de Vías (INVIAS) y el Ministerio de Transporte de Colombia en el 2013.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

Acorde con el paquete computacional utilizado puede haber una gran cantidad de parámetros de calibración. Pero independiente del paquete computacional utilizado existen parámetros intrínsecos a las mismas ecuaciones de gobierno que muy posiblemente se tendrán que calibrar. En la Tabla 6-1 se resume y describe algunos de los parámetros principales:

Tabla 6-1 Parámetros de Calibración

COMP.	PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Hidrodinámica	Coeficiente de Rugosidad	Este parámetro tiene una directa relación con ajustes los niveles de agua y velocidad. Está asociado a la resistencia que oponen las diferentes formas del lecho y material del mismo. Puede ser ingresado a los modelos como un valor constante, como un mapa de coeficientes constantes o una formula en función de la profundidad.
	Viscosidad Turbulenta	Este parámetro está asociado a la calibración de los vectores de velocidad del cauce y depende del estado de turbulencia del mismo. Los valores promedios de velocidad vertical de los modelos 2D pueden variar a lo largo entre los puntos de una misma sección transversal. Este parámetro usualmente se encuentra entre 0.2 m ² /s y 5.0 m ² /s.
Sedimentología/ Morfología	Ecuación de Transporte	Es un parámetro cualitativo del modelo cuya elección usualmente depende de la granulometría.
	Factor de Carga de Lecho	Algunas ecuaciones de transporte realizan el cálculo de la carga total. Y por ello se deben definir coeficientes proporcionales que dividan los porcentajes de esta carga asociados al transporte de lecho y el suspendido.
	Factor de Carga en Suspensión	
	Pendiente Longitudinal	Estos son parámetros funcionales que establecen el comportamiento de la pendiente transversal y longitudinal del cauce. Varían dependiendo de cada río. Pero se presentan algunas relaciones dadas de acuerdo con la experiencia.
	Pendiente Transversal	
	Flujo	Este parámetro define la intensidad del flujo helicoidal

COMP.	PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
	Helicoidal	producido en el lecho debido a las corrientes secundarias en las curvas de los ríos. Usualmente se asume como 1, pero el manual de MIKE21C expresa que puede variar entre 0.4 y 1.2.
	Tasa de Erosión Orillas	Para MIKE 21C, este elemento se calibra por medio de 3 subparámetros los cuales son los coeficientes presentados en la sección □. Estos coeficientes relacionan la pendiente transversal de la orilla (α), la fracción de la tasa de transporte de sedimentos cerca de la orilla (β) y un γ el último término representa una constante de erosión la cual es independiente de las condiciones hidráulicas.

Fuente: (DHI, 2004)

6.2 DEFINICIÓN VARIABLES DE ANÁLISIS E INDICADORES DE CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA, SEDIMENTOLÓGICA Y MORFOLÓGICA

Para una metodología de calibración orientada al ajuste manual de los parámetros es de vital importancia reducir el número de parámetros a calibrar, pues de este número dependerá el tamaño del diseño experimental a realizar para la calibración.

Solo se deberán incluir aquellos parámetros que conceptualmente representan un posible factor descriptor de la variabilidad del modelo.

Es posible que, debido a las características propias del cauce, el tipo de variables analizadas y la resolución temporal y espacial de las simulaciones algunos de estos parámetros de calibración puedan dejar de ser relevantes y adopten valores estándar. Algunos contextos y/o criterios a utilizar para simplificar pueden ser:

- **El Objetivo de modelación:** Dependiendo de la finalidad del modelo, algunos de los parámetros pueden ser simplificados. Entre los fines más comunes para la construcción de este tipo de modelos 2D están la realización de pronósticos hidromorfológicos; modelos para la gestión y control de inundaciones; y modelos para el diseño y evaluación de obras hidráulicas (protección, rehabilitación, entrenamiento, restauración y navegación).

En este orden de ideas puede que algunos parámetros sean priorizados sobre otros. En modelos 2D desarrollados con el enfoque de análisis de riesgo de inundación generalmente se concentra en el análisis de la hidrodinámica (de variables como niveles, velocidades y caudal transitados por el cauce) y no se realiza un ajuste detallada en formas de lecho. En dicho contexto se prioriza el ajuste exhaustivo del coeficiente de rugosidad por su directa relación con niveles de agua obtenidos.

- **Las condiciones Hidráulicas, Sedimentológicas y Morfológicas del Tramo:** Debido a las características hidráulicas, sedimentológicas y/o morfológicas propias del tramo a modelar es posible que este permita realizar algunas simplificaciones. La existencia de estructuras hidráulicas o protecciones marginales puede que condicionen los procesos erosivos en las orillas y este sea un parámetro que no sea necesario considerar. Análogamente, puede que la granulometría del río se ajuste solo a un tipo de ecuación de transporte, eliminando este parámetro de la lista de parámetros de calibración.
- **El domino temporal y espacial del modelo:** Dependiendo del análisis temporal y espacial a realizar con el modelo, hay ciertos parámetros cuyo efecto puede dejar de ser significativo. Un ejemplo claro es la escala temporal en que se analiza la erosión de orillas. En intervalos reducidos puede que los procesos de erosión en los márgenes dejen de ser significativos; pero en intervalos grandes la calibración de los márgenes es un paso obligado.

6.3 DEFINICIÓN DE INDICADORES DE CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA, SEDIMENTOLÓGICA Y MORFOLÓGICA

Para determinar el grado de ajuste alcanzado por cada componente y el modelo en general durante el proceso de calibración, se definieron indicadores de ajustes cualitativos y cuantitativos entre variables medidas y simuladas, los cuales se describen a continuación:

6.3.1 Indicadores Cuantitativos

Los indicadores cuantitativos son coeficientes de determinación (R^2) aplicados a variables de los cuales se tiene una referencia observa y una modelada. Aunque

estos indicadores dependerán de la disponibilidad de la información de referencia, se recomiendan los siguientes.

- **Ajuste de la serie de niveles de agua (NA):** Es un coeficiente de determinación (R^2) entre la serie de niveles de agua medidos en estaciones limnimétricas o secciones de control; y la serie de niveles de agua obtenida por el modelo para esta misma ubicación. El ajuste de esta variable de análisis está ligada al coeficiente de rugosidad del modelo.
- **Ajuste de serie de Caudales (Q):** Es un coeficiente de determinación (R^2) entre la serie de caudales medidos en secciones de control; y la serie caudales obtenidos por el modelo para esta misma ubicación. El ajuste de esta variable de análisis está ligada al coeficiente de rugosidad del modelo y a los cambios morfológicos producidos en la sección transversal.
- **Ajuste de la distribución de caudales (DQ):** Este indicador es aplicado a secciones con islas que compara la distribución de caudales entre los brazos de las mismas. Es un coeficiente de determinación (R^2) entre el porcentaje de los caudales medidos y los simulados. El porcentaje de los caudales simulados serán calculado con base al caudal transitado en cada brazo; y los caudales medidos pueden estar referidos a estaciones de control o mediciones ADCP. El ajuste de esta variable de análisis dependerá del coeficiente de rugosidad y las interacciones propias de la hidrodinámica y morfología del cauce evaluado.
- **Ajuste de la matriz de Profundidades (MP):** Es un coeficiente de determinación (R^2) entre las mediciones batimétricas para fechas específicas y las profundidades simuladas por el modelo 2D. Esta variable depende de la rugosidad y las interacciones propias de la hidrodinámica y morfológicas del cauce evaluado.
- **Ajuste de las tasas de transporte sedimentos en suspensión (TSS), tasas de transporte sedimentos de lecho (TSB) y Ajuste de las tasas de transporte sedimentos totales (ST):** Es un coeficiente de determinación (R^2) realizado entre la serie de transporte de sedimentos medida en una estación de control y la simulada por el modelo. No obstante, en casos en donde no se posee un registro continuo de las tasas de transporte de sedimentos, una alternativa para obtener el referente a ajustar puede ser utilizar una regresión de Caudal Líquido (Ql) Vs. Caudal sólido (Qs) a partir de los datos históricos. El comportamiento de esta

variable depende de la ecuación de transporte de sedimentos y los coeficientes de carga en suspensión y carga de lecho.

- **Ajuste del nivel de lecho (NL):** Es un coeficiente de determinación (R^2) calculado entre las cotas de lecho medidas y las generadas por el modelo. Esto permite determinar el ajuste del modelo a las formas de lecho medidas. Esta variable de análisis depende de la ecuación de transporte, coeficiente de carga de lecho (K_s), la pendiente longitudinal y la pendiente transversal.
- **Ajuste de la tasa de erosión de las orillas (TEO):** Es un coeficiente de determinación (R^2) entre la tasa de erosión o desplazamiento de la orilla simulada y la margen observada. Aplica para islas y los márgenes del cauce. Esta variable de análisis depende de los coeficientes utilizados en la ecuación de erosión de islas utilizada en el modelo.

Vale la pena recordar, que las formas de cálculo de la tasa de erosión de orillas es un tema en desarrollo dentro de los modelos numéricos, por lo que dependiendo del paquete computacional las variables y la forma de calibrar este componente puede variar.

6.3.2 Indicadores Cualitativos

Se definieron indicadores cualitativos asociados a variables que temporal o espacial no es numéricamente fácil de calcular; o variables que deben ser interpretadas por la pericia del modelador. Estos indicadores están orientados a verificar la coherencia y correspondencia de los datos medidos y los simulados. Estos indicadores deben tener un dominio limitado y práctico, por ejemplo: bueno, regular y malo. Dentro de la tipología de este indicador se recomienda considerar:

- **Ajuste de los vectores de velocidad (Magnitud y dirección):** Este tipo de indicador es aplicado cuando se poseen mediciones ADCP o similares que permitan comparar la magnitud y la dirección de los vectores de velocidad. Aunque este parámetro corresponde a magnitudes escalares medidas y simuladas sobre las cuales se podría establecer un coeficiente de determinación, la experiencia en el manejo de modelos por parte de Uninorte (2000 y 2011) ha mostrado que es necesario ver el contexto temporal y espacial en el cual se compara esta variable. Es posible que los ajustes se presenten en intervalos de tiempo y/o en celdas cercanas a donde se encuentra la medición.

- **Coherencia en la evolución morfológica del lecho:** El indicador visual relacionado a la evolución morfológica del lecho, busca determinar si la evolución temporal y espacial de las formas de lecho va de acorde con los resultados esperados por el modelo. Es posible que el modelo llegue a una condición final de lecho cercana al valor observado, pero que los procesos morfológicos ocurridos durante la simulación no sean coherentes. Ejemplo de ello puede ser formación de turbulencias, erosión o sedimentación excesiva en zonas particulares, cambios morfológicos abruptos sobre orillas y/o islas, etcétera.

6.3.3 Indicador de Ajuste por componente y Global

Se definirá que un componente se encuentra calibrado cuando este alcance valores satisfactorios en el ajuste de los indicadores cuantitativos; y cuando los indicadores cualitativos utilizados cumplan el criterio de ajuste del usuario. La Tabla 6-2 muestra los indicadores asociados a cada componente:

Tabla 6-2 Indicadores por Componente

Componentes	Indicador
Hidrodinámica	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste de la serie de nivel de agua (NA): • Ajuste de serie de Caudales (Q) • Ajuste de la distribución de caudales (DQ) • Ajuste de la matriz de Profundidades (MP)
Sedimentología	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste de las tasas de transporte sedimentos en suspensión (TSS) • Ajuste de las Tasa de transporte de sedimentos de lecho (TSB) • Ajuste de las de transporte de sedimentos totales (ST)
Morfología	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste del Nivel del lecho (NL) • Ajuste de la tasa de erosión de orillas (TEO)

Fuente: Elaboración Propia

Con los indicadores individuales se propone generar tres indicadores ponderados: Indicador de Ajuste Hidrodinámico (IPA-HD) expresado como una combinación lineal de los indicadores asociados a este componente; un Indicador de Ajuste Morfodinámico (IPA-MF) como un promedio de los ajustes alcanzados por el componente sedimentológico y morfológico; y un Indicador Global de Ajuste (IPA) como un promedio ponderado con todos los indicadores cualitativos:

$$IPA = \beta_1 NA + \beta_2 Q + \beta_3 DQ + \beta_4 MP + \beta_5 TSS + \beta_6 TSB + \beta_7 ST + \beta_8 NL + \beta_9 TEO$$

Donde $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$

Las ponderaciones asignadas y la cantidad de indicadores que se decidan utilizar podrán ser modificadas acorde con los criterios del usuario de la metodología. Este indicador tiene como ser utilizado como un elemento descriptivo del ajuste final y ser la variable de respuesta del diseño experimental.

6.4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Una vez seleccionados los parámetros y definidos los indicadores, el modelador debe proponer un diseño experimental. La metodología propone realizar 2 diseños en serie. El primer diseño para la calibración del componente hidrodinámico, y el segundo para la calibración conjunta del componente sedimentológico y morfológico. La variable respuesta para el análisis del diseño de experimentos serán los indicadores definidos previamente.

Dado que la cantidad de parámetros puede llegar a ser algo grande, se recomienda realizar un experimento 2^k para obtener los parámetros e interacciones significativas y después un 3^k (o superior) para identificar el comportamiento del sistema y optimizar el parámetro de calibración.

Aunque la recomendación general es utilizar diseños factoriales balanceados se reconoce que la tipología del diseño propuesto puede variar acorde con la disponibilidad de tiempo y recursos para realizar las corridas de calibración. La tipología del diseño experimental puede ser definida por las restricciones de modelador que realiza el proceso de calibración.

Dado que la respuesta de cada escenario del diseño de experimento proviene de un proceso netamente determinístico, no se considera necesario realizar replicas. No obstante, se tiene claro que los procesos de resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de fondo en estos modelos pueden estar asociados procesos de optimización heurística que incluyen en sí mismos procesos probabilísticos y cierto grado de variabilidad.

Por otra parte, la gran mayoría de parámetros de calibración son numéricos y continuos, de modo que el proceso de análisis y optimización es conceptualmente simple y puede agilizado implementando herramientas informáticas estadísticas comerciales como Statgraphic, Minitab y los complementos de optimización de Matlab.

6.5 PROCESO DE CALIBRACIÓN

El proceso comienza con la calibración hidrodinámica. El coeficiente de rugosidad de (Chezy o Manning) es típicamente el principal parámetro de calibración, dado que ajusta el nivel de agua, el caudal y tiene influencia en la distribución de flujo entre las islas. A menos que la tipología del río presente algún tipo de contracción o cambio abrupto en la sección transversal, es probable que el coeficiente de viscosidad turbulenta (Eddy Viscosity) sea poco significativo (Dorfmann & Knoblauch, 2008).

Típicamente, cuando la relación entre los flujos de alta y baja (Q_{max}/Q_{min}) es baja, la calibración hidrodinámica no requiere incluir el componente sedimentológico y morfológico pues los cambios en el lecho no son significativos. En este caso, la calibración se lleva a cabo de forma secuencial como hidrodinámico-transporte de sedimentos-morfología. Sin embargo, cuando la relación Q_{max}/Q_{min} es alta, por lo general el cambio de nivel de lecho también es alto y la profundidad del agua reduce lo suficiente como para modificar la rugosidad, la geometría de la sección y consecuentemente la hidrodinámica. En este caso, la calibración secuencial no es factible y es necesario para realizar la calibración hidrodinámica ejecutando de fondo los componentes sedimentológicos y morfológicos.

Para la ejecución de los componentes sedimentológicos y morfológicos es necesario definir temporalmente algunos valores iniciales para los parámetros de calibración o semilla morfológica inicial. Estos valores deberán ser establecidos por medio de un análisis conceptual, a través de valores de referencia en la literatura o analogía del tramo de cauce a modelar con otro sector del mismo río o con ríos similares.

El nivel de ajuste del componente hidrodinámico puede ser establecido por medio del IPA-HD.

Una vez terminada la calibración hidrodinámica, será necesario abordar la calibración sedimentológica y morfológica. Esta calibración se lleva a cabo por medio de un diseño experimental que permita identificar los parámetros significativos y sus interacciones; y que permita identificar una zona robusta de operación para el modelo. Como respuesta de este diseño experimental puede utilizarse IPA-MF, verificando en cada condición experimental que no se pierda el ajuste hidrodinámico hasta ahora conseguido; o utilizando el IPA el cual incluye los indicadores hidrodinámicos.

No se considera necesario utilizar replicas puesto que los resultados provienen de un modelo numérico sin parámetros probabilísticos explícitos.

El orden secuencial de los pasos de la metodología propuesta se presenta en la Figura 6—1.

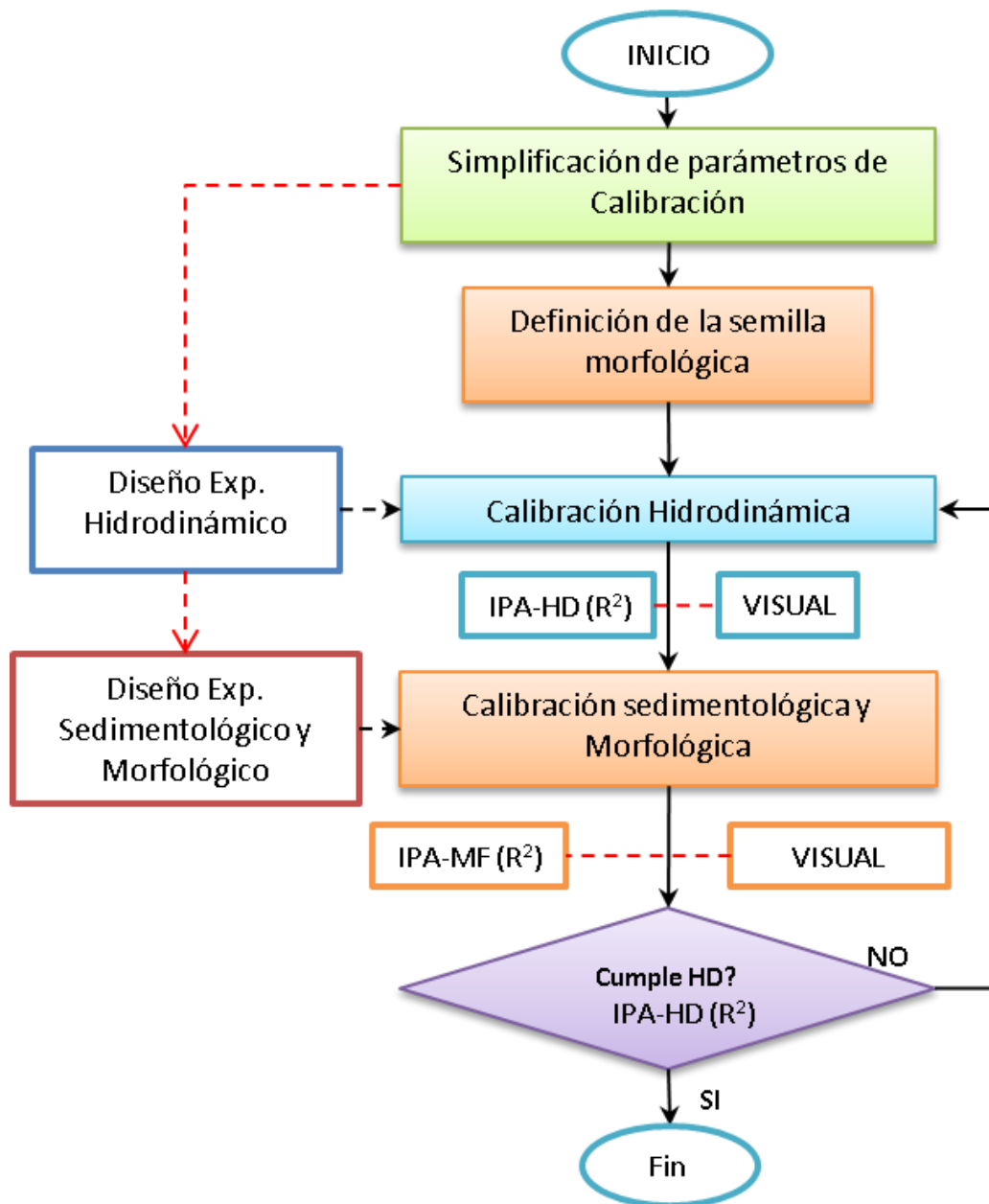


Figura 6—1 Flujograma

6.6 EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DE ESTUDIO: RÍO META, COLOMBIA

La metodología de calibración y la información obtenida para la misma fue desarrollada y obtenida en el marco del desarrollo de los estudios *Actualización De Los Estudios Y Diseños Para La Navegabilidad Entre Cabuyaro (K804) Y Puerto Carreño (K0)* realizados por la Universidad del Norte (2013) para Instituto de Nacional de Vías - INVIAS y el Ministerio de Transporte de Colombia.

La recuperación de la navegabilidad en los ríos colombianos, dentro de los que se encuentra el río Meta, es uno de los objetivos del gobierno colombiano en los últimos años. De allí que le fue encargado a la Universidad del Norte sus respectivo análisis y modelación para identificar las medidas requeridas para mejorar las condiciones de navegabilidad.

Para el estudio se utilizaron mediciones de profundidad, velocidad y caudal realizadas entre la desembocadura del río Orinoco (K0) y el pueblo de Cabuyaro (K796) en el río Meta en los períodos entre el 26 agosto y 25 de septiembre del 2012 (Campaña I); y diciembre del 2012 a enero del 2013 (Campaña II), Además se contó con registros hidrológicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM, e imágenes satelitales Landsat (NASA).

6.6.1 Área De Estudio

El río Meta, hace parte de las subcuencas del río Orinoco en territorio colombiano, con un área de 99.500Km^2 aproximadamente y una longitud en su cauce de 1002Km desde su nacimiento por el corredor del río Metica y Guamal hasta su desembocadura en el río Orinoco (Ministerio de Transporte, 2005). La característica hidrológica más representativa de este río, es en la variación entre los caudales de su hidrograma anual. De los registros históricos de caudales entre 1983-2010 en la estación hidrométrica del IDEAM “Aceitico” (ubicada a 127 Km de la desembocadura en el Orinoco) se encontró que el hidrograma presentaba caudales máximos promedios cercanos a $10,323\text{m}^3/\text{s}$ y mínimos promedios en $755.25\text{m}^3/\text{s}$. La relación entre máximos y mínimos registrados en esta estación de medición es de $Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}=13.67$ lo cual indica una gran variabilidad ente la magnitud de los caudales transitados. Además, se reconoció en todos los registros de las estaciones hidrométricas una tendencia unimodal, con caudales altos entre mayo y agosto; y caudales bajos entre inicios diciembre y finales de febrero.

Las mediciones sedimentológicas registradas por el IDEAM en sus estaciones Puerto Texas (K669), Aguaverde (K360) y Aceitico (K127) permitieron establecer que el material predominante en el río son arenas con pequeñas partes de limo, con un tamaño medio del grano en el fondo ($D_{50\text{-fondo}}$) está alrededor 0.35mm y un tamaño medio del grano suspendido ($D_{50\text{-susp}}$) entre 0.057-0.17m. Asimismo, la tasa de transporte sedimentos señaló una fuerte correlación con los caudales líquidos transitados, quienes de acuerdo con los registros el IDEAM, para la estación “Aceitico” son 419,680.5 a 4,056.6Ton/día, para los caudales máximos y mínimos promedios respectivamente.

Los estudios de geomorfología realizados durante el proyecto, establecieron que el Meta poseía para el 2012(agosto-septiembre) una morfología 34% tabular, 26% sinuosa/meandro, 24% recta, 10% trenzado y 6% anastomosado. Aunque no se reconoció una forma morfológica preferente, las imágenes satelitales y fotografías áreas entre 1986-2012 detectaron una alta movilidad lateral y frontal del cauce. A través de la revisión de estas imágenes satelitales también fue identificado un lecho mayor de 3 a 9Km de ancho.

A partir de la caracterización previamente señalada y debido a la incapacidad técnica y financiera de modelar todo el río, fue seleccionado un sector de análisis de 75Km de longitud ubicado las abscisas K235 ($6^{\circ}6'18.81''\text{N}$ / $69^{\circ}12'55.04''\text{O}$) y K310 ($6^{\circ}2'50.38''\text{N}$ / $69^{\circ}44'40.11''\text{O}$) (Véase Figura 6—2). Su definición estuvo basada en: **1) Estabilidad Hidráulicas y Sedimentológica:** Este tramo se aguas abajo del último afluente significativo del río Meta, de modo que las variaciones en el régimen hidráulico y sedimentológico hasta su desembocadura son poco significativas. **2) Tipología Morfológica:** Posee una tipología morfológica trenzada, recta y sinuosa que permite asociar los patrones de respuesta morfológicos a gran parte del río.

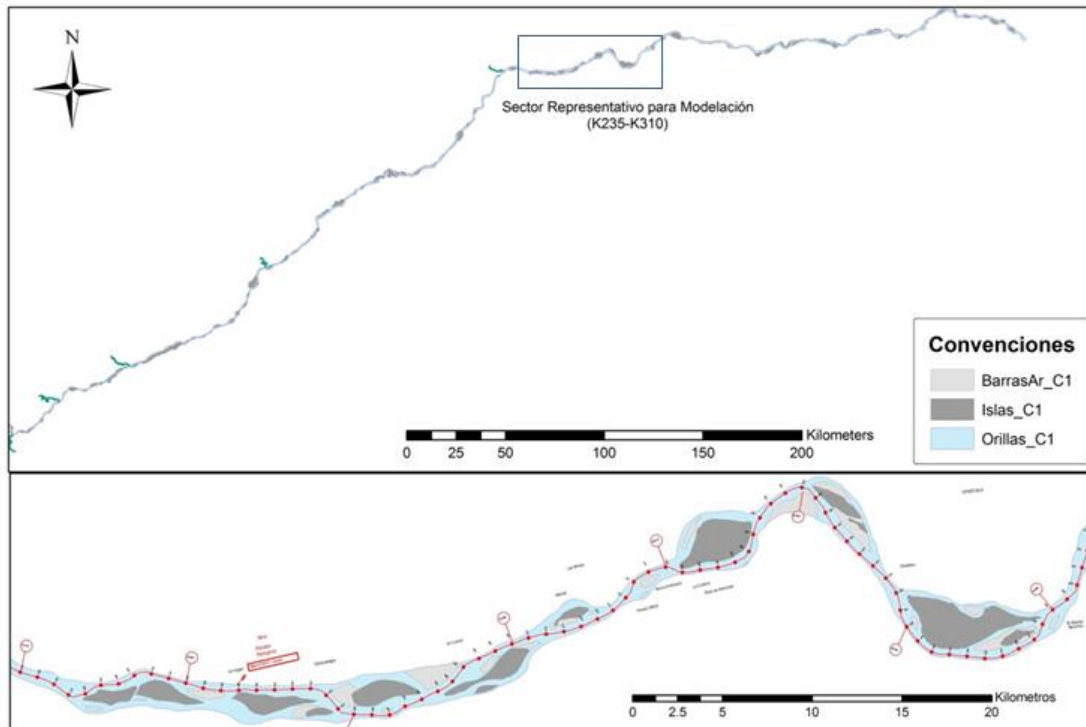


Figura 6—2 Sector representativo K235 - K310

Fuente: Elaboración Propia:

La malla computacional usada para la modelación y calibración de este sector fue realizada con el generador de mallas del modelo MIKE-21 y su resolución fue de 1,074 x 64 (J x K), área promedio por celda de 1,580 m², y dimensiones promedio de 31 x 50m (Véase Figura 6—3)

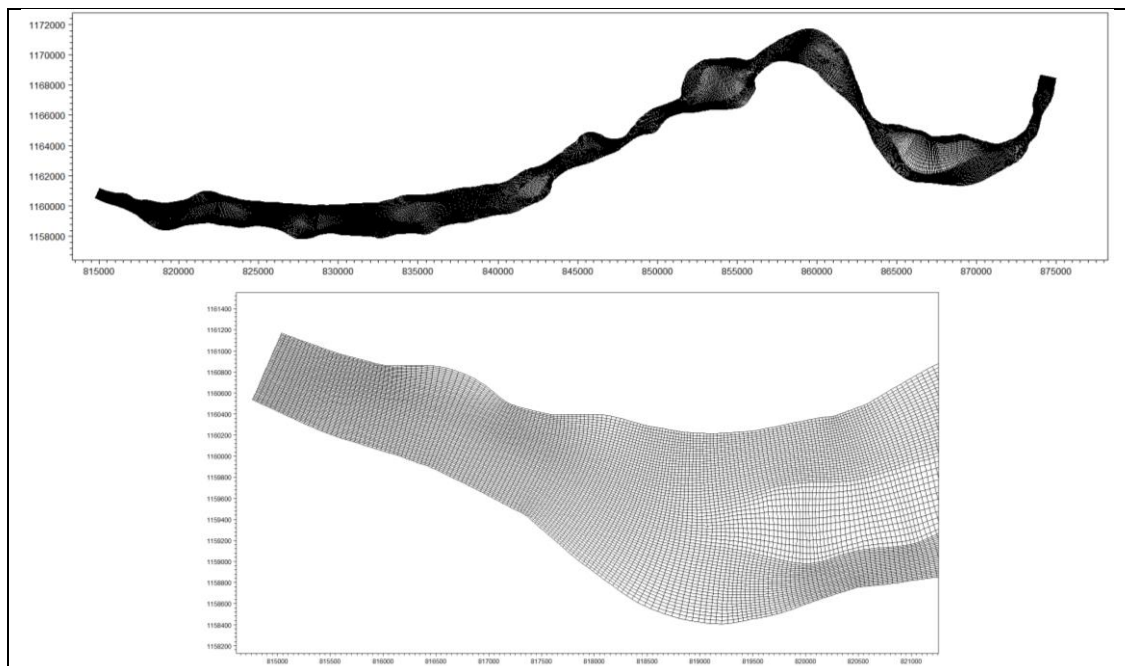


Figura 6—3 Malla Tipo 2 sector representativo K235 - K310 de 1074x64
Fuente: Elaboración propia

6.6.2 Condiciones de Frontera de Frontera para Modelación 2D del Río Meta

Para la calibración hidrodinámica se utilizó como condición de frontera el hidrograma de niveles y caudales entre Septiembre 12 de 2012 y Febrero 1 de 2013, correspondientes a las fechas de inicio y final de los levantamientos en el sector de las campañas I y II, respectivamente. Debido a que para la fecha de trabajo no se contó con las serie de tiempo de niveles y/o caudales en estaciones cercanas al sector representativo, se creó un hidrograma sintético.

Para la elaboración de hidrograma sintético se realizó una analogía con el comportamiento observado en los niveles de las estaciones IDEAM Humapo (K732) y Puerto Carreño (K0). Estas mostraron una tendencia descendente, yendo desde niveles con un 25% de probabilidad de excedencia a otros con al 95% de probabilidad. Estos valores son consecuentes con la excedencia de los niveles de agua medidos en las campañas en el sector representativo y asociados a las estaciones IDEAM Aguaverde (K360) y Aceitico (K127). Por lo tanto, es válido el uso de estos niveles de excedencia en las estaciones IDEAM Aguaverde y Aceitico para este período específico.

Con el hidrograma sintético de niveles (Véase Figura 6—4) se utilizó las relaciones H Vs. Q (Véase Figura 6—5) obtenidas por un modelo 1D realizado por la Universidad del Norte (2013) para calcular el hidrograma sintético de caudales asociado (Véase Figura 6—6).

Para la condición de frontera aguas arriba se utilizaron una serie de caudales y para la condición de frontera aguas abajo la serie de niveles.

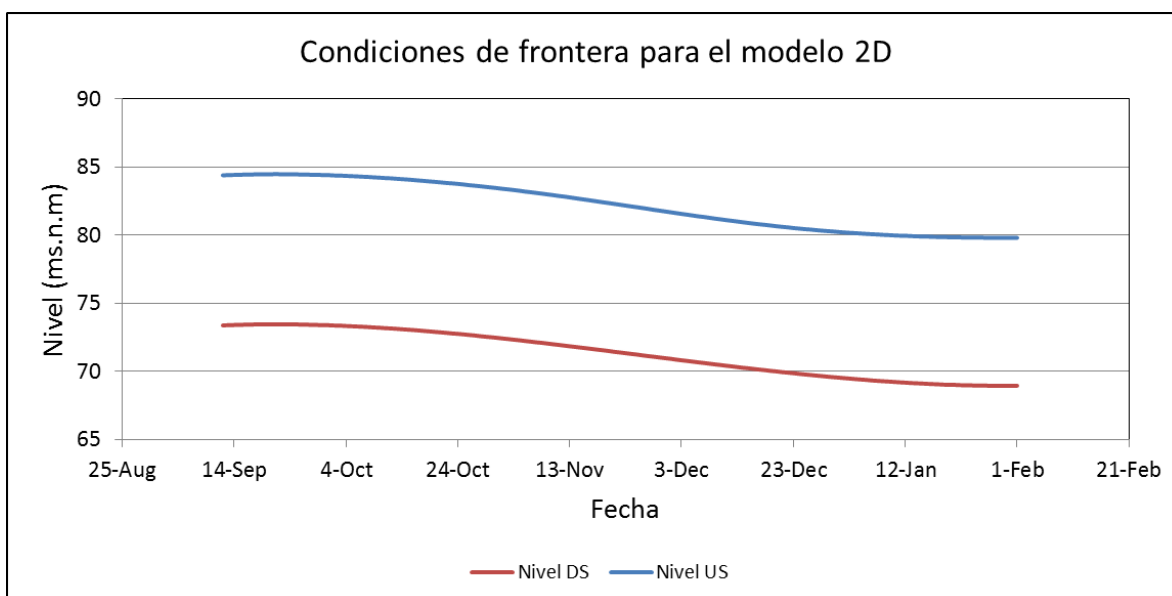


Figura 6—4 Condiciones de frontera para la validación hidrodinámica del modelo 2D.
Fuente: Elaboración propia

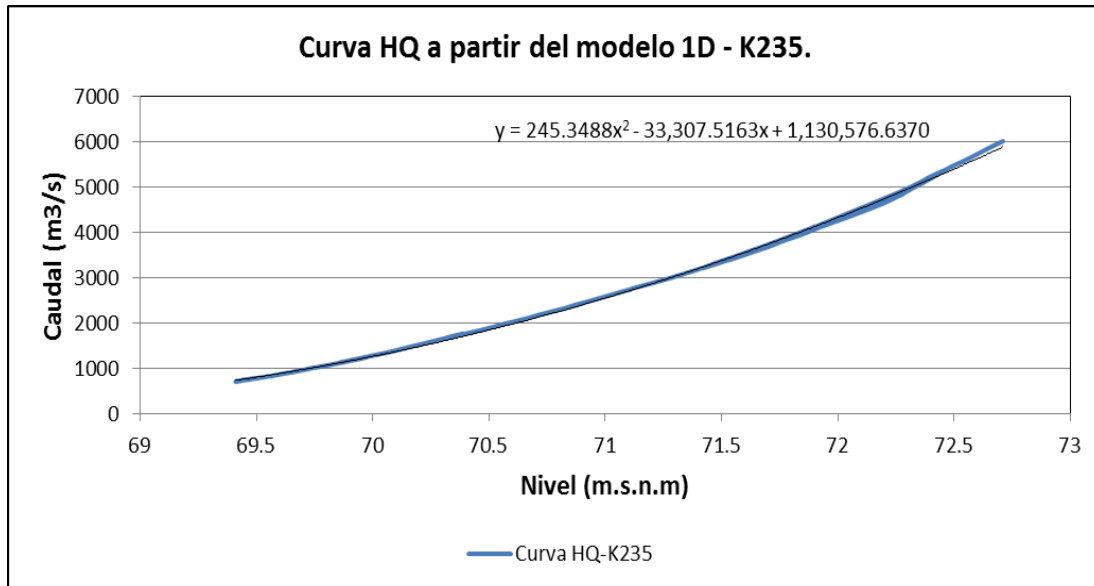


Figura 6—5 Curva HQ a partir del Modelo1D para el K235
Fuente: Elaboración propia

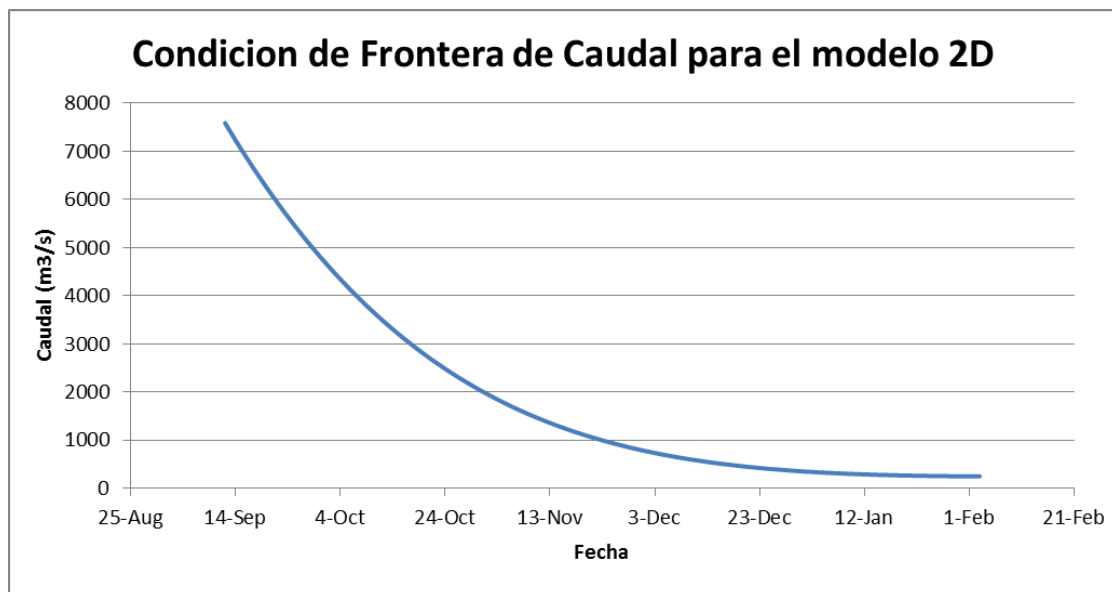


Figura 6—6 Condición de Frontera de Caudal para el modelo 2D en K235
Fuente: Elaboración propia

6.6.3 Definición de Indicadores para Modelo del Río Meta

Para la calibración del modelo del río Meta se consideró la información de medida que podría ser usada como elemento comparativo en los indicadores. Esta información medida se obtuvo principalmente de las dos campañas de medición en campo realizadas por Uninorte (2013): Campaña I, realizada de entre Agosto y Septiembre del 2012; y Campaña II realizada de Diciembre del 2012 a Enero del 2013; en las cuales se recolectó información batimétrica, niveles de agua y mediciones de perfiles de velocidad con ADCP.

Acorde con esto se establecieron los siguientes elementos comparativos para el modelo del río Meta:

- **Ajuste de la serie de nivel de agua (NA):** Se calculó un coeficiente de determinación (R^2) entre el hidrograma sintético de niveles ingresados y los niveles de agua simulados. El periodo de comparación de la serie de niveles de agua correspondió al intervalo de calibración definido entre el 12 de Agosto del 2012 hasta el 3 de Enero 2013. El punto de comparación fue abscisa K310 correspondiente a la condición de frontera aguas arriba.
- **Ajuste de la distribución de caudales (DQ):** Este indicador consiste en una comparación por medio de un coeficiente de determinación (R^2) de los porcentajes de distribución de caudales entre los brazos medidos durante la Campaña II y los calculados por el modelo 2D.

Las secciones tomadas como referencia se presentan en la Figura 6—7 y los respectivos porcentajes de estas se presentan en la Tabla 6-3.

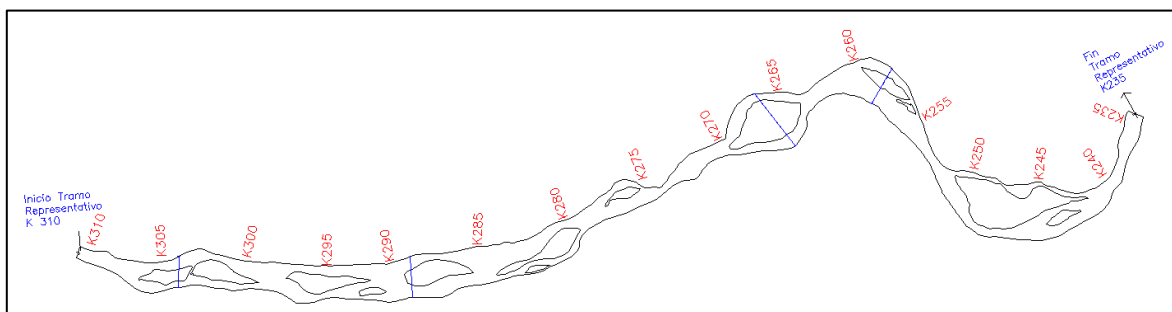


Tabla 6-3 Distribución de caudales en islas del sector representativo. Caudales medidos en Campaña I

Abscisa (Km)	Brazo Derecho (%)	Brazo Izquierdo (%)
304	29	71
289	84	16
267	74	26
257	98	2

Fuente: Elaboración propia

- **Comparación Visual de los vectores de Velocidad (Indicador Visual):** Se realizó una comparación visual de los vectores de velocidad simulados y los medidos en los perfiles de velocidad ADCP. Se supuso que el valor promedio de velocidad en las columnas medidas estaría cercano a $0.6H$, donde H es la altura de la columna de agua. Las secciones ADCP utilizadas en esta comparación se presentan en la Figura 6—8 y Figura 6—9

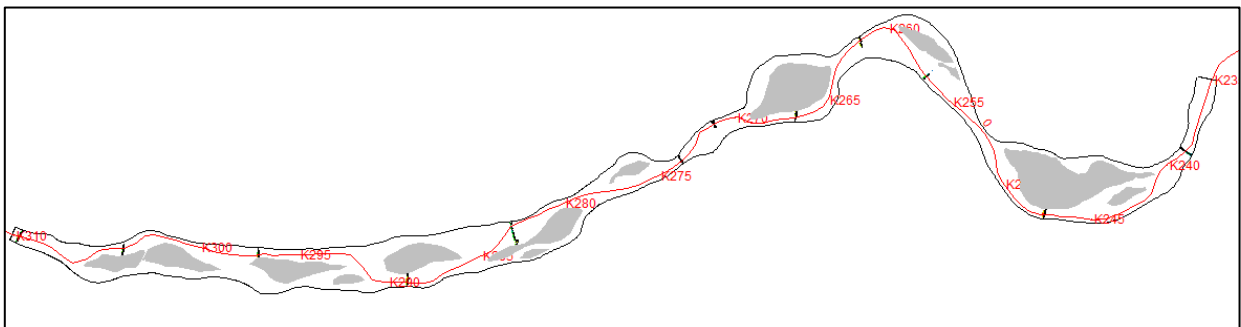


Figura 6—8 Ubicación de aforos ADCP dentro del sector representativo
Fuente: Uninorte (2013)

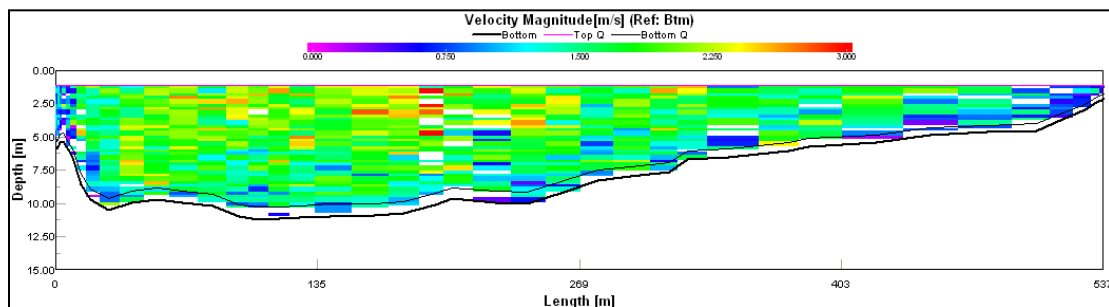


Figura 6—9 Sección Transversal aforos ADCP dentro del sector representativo
Fuente: Uninorte (2013)

- **Ajuste de las tasas de transporte sedimentos en suspensión y la tasa de transporte de sedimentos calculada con una regresión de los modelos históricos (TSS):** Para los procesos de calibración se contó con los registros de transporte total en suspensión en la estación IDEAM Aceitico (K127) entre 1996 y el 2010 (Véase Figura 6—10). Estos valores registrados incluyen el transporte en suspensión de material de lecho y la carga de lavado.

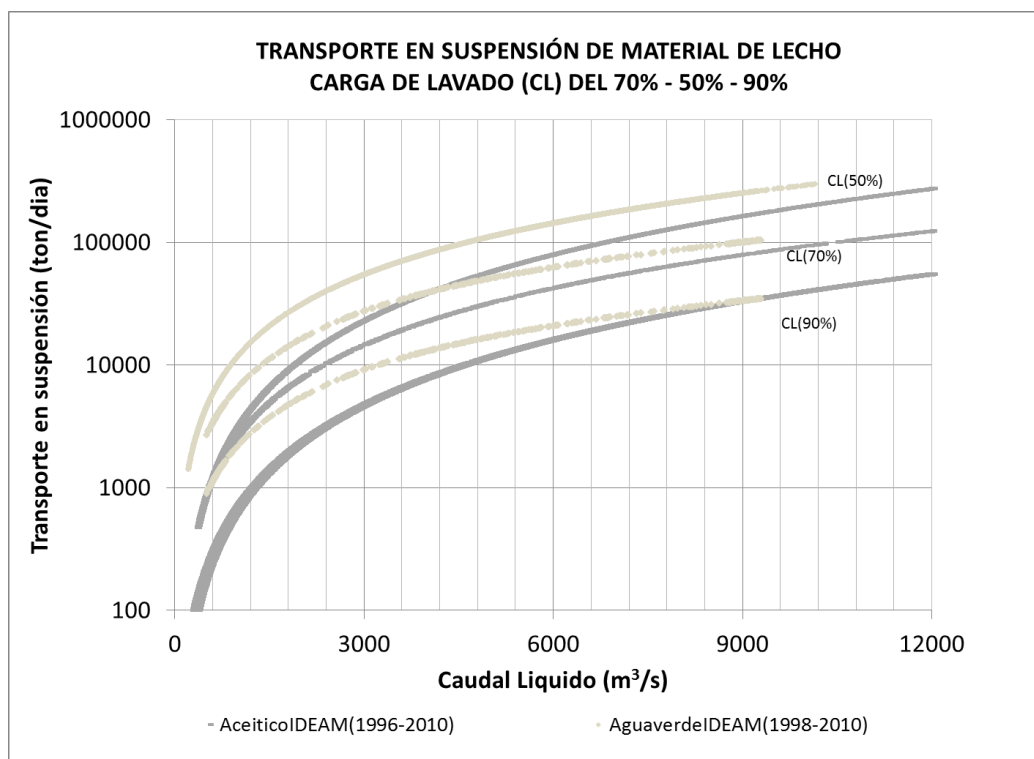


Figura 6—10 Transporte en suspensión de material de lecho en Estaciones Aceitico IDEAM (K127) y Aguaverde IDEAM (K360)

Fuente: Elaboración Propia con información Uninorte (2013)

Debido a que modelos no son capaces de modelar y discriminar la carga de lavado, se le aplicó un porcentaje de reducción de la carga total reportada por las estaciones IDEAM de modo que se pudiese hacer una comparación equivalente. Se consideró una carga de lavado de 70% con un rango límite de 50 – 90%. Este valor fue estimado en consenso con el conjunto de expertos del proyecto, quienes realizaron una analogía entre las mediciones de sedimentológicas entre el río Meta y el Magdalena.

Como puede ser observado los datos históricos del IDEAM en realidad corresponden a regresiones establecidas por esta entidad. De modo que para fines prácticos se obtuvo la ecuación de la misma:

$$Q_s = 0.0096Q_l^{1.774} \text{ (Para una carga de lavado de 70\%)}$$

Donde

Q_s = Caudal sólido (Ton/día)

Q_l = Caudal líquido transitado (m^3/s)

Para el cálculo de los R^2 se comparó el valor simulado con el valor de caudal obtenido para el caudal líquido equivalente.

- **Ajuste del Nivel del lecho (NL):** Se calculó un coeficiente de determinación (R^2) entre la matriz de valores de la malla equivalente a las mediciones batimétricas de nivel de lecho medidas durante la Campaña II y las simuladas por MIKE 21C.
- **Evolución morfológica adecuada (Indicador Cualitativo):** Consientes que debe haber una coherencia en los procesos de evolución morfológica, se realizó una inspección visual del comportamiento del lecho y las profundidades obtenidas. A criterio del modelador se revisó que no ocurriesen cambios abruptos o fenómenos irreales dentro del intervalo de modelación.

Se implementaron 2 indicadores: El indicador ponderado de ajuste hidrodinámico (IPA-HD) y el indicador ponderado de ajuste sedimentológico y morfológico (IPA-MF). Los porcentajes fueron elegidos con base en la confiabilidad y variabilidad de la información de referencia.

$$IPA - HD = 0.6NA + 0.4DQ$$

$$IPA - MF = 0.3TSS + 0.7NL$$

El ajuste final obtenido se expresó en términos del IPA Global, como:

$$IPA = 0.3NA + 0.2DQ + 0.15TSS + 0.35NL$$

Nótese que debido a la baja variabilidad que puede llegar a tener el porcentaje de distribución de caudales a este se le asignó una ponderación menor.

6.6.4 Selección y Simplificaron de Parámetros para Calibración del Modelo de Río Meta

En busca de realizar una simplificación de los parámetros del modelo y establecer cuáles serían las limitaciones y condiciones del modelo, se realizó una revisión de las condiciones hidrodinámica, sedimentológicas y morfológicas del sector en los últimos años. Se analizó las series de tiempo de niveles, caudales, datos de granulometrías y tasas de transporte de sedimentos registradas por el IDEAM en la estación más cercana.

Se analizaron las imágenes Landsat y los registros hidrológicos entre los años 2000-2012 en busca de identificar características propias del sector de modelación que permitiesen la simplificación de parámetros. Para fines ilustrativos se tomó como referencia la variación del río entre 1999 al 2000 correspondientes a caudales bajos y medios (véase hidrograma en la Figura 6—11). Este intervalo seleccionando posee una tendencia cercana a los cuales medios (50% de probabilidad de excedencia) y el registro de imágenes presento baja nubosidad permitiendo mayor disponibilidad de imágenes satelitales en la zona.

En la Figura 6—12 se presenta algunas imágenes entre el 27 de Noviembre del 1999 y 14 de enero de 2000 las cuales permiten distinguir la rápida formación de barras de arena en el sector en un período de 2 meses. Esta rápida formación repercute en la distribución de caudales sobre los brazos de las islas y en el sentido predominante del flujo dentro del cauce activo. Para caudales bajos, el flujo tiende a concentrarse en un solo brazo en la mayor parte del sector.

No se identificaron procesos significativos de erosión marginal en el transcurso del año. Sin embargo, su influencia es considerable para intervalos mayores a 3 años. Por su parte los procesos de sedimentación muestran la consolidación de barras adjuntas a las islas con vegetación.

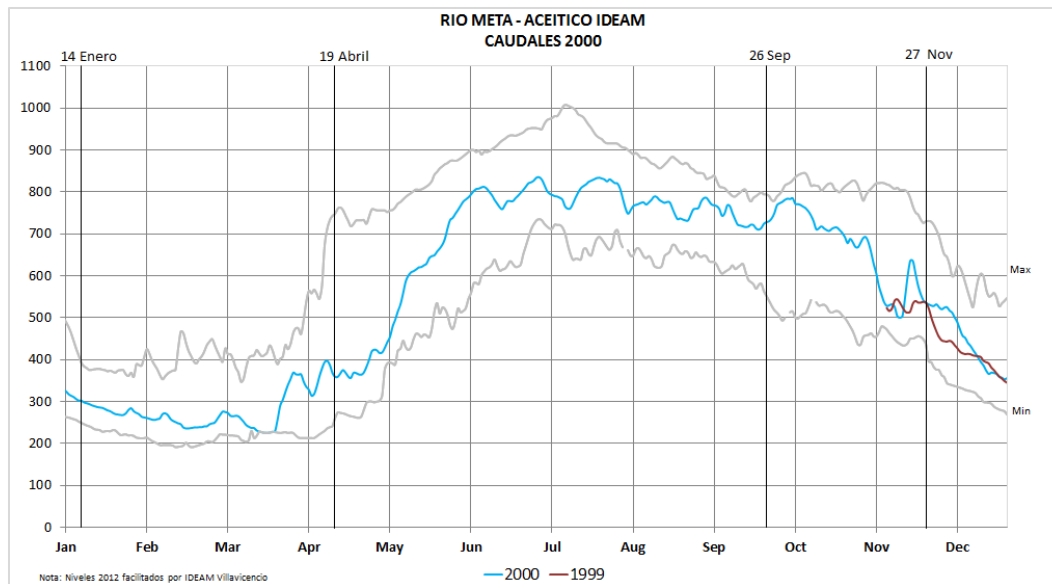


Figura 6—11 Hidrograma de la estación IDEAM Aceitico (K127) entre 1999-2000.
Fuente: Elaboración Propia con información Uninorte (2013)

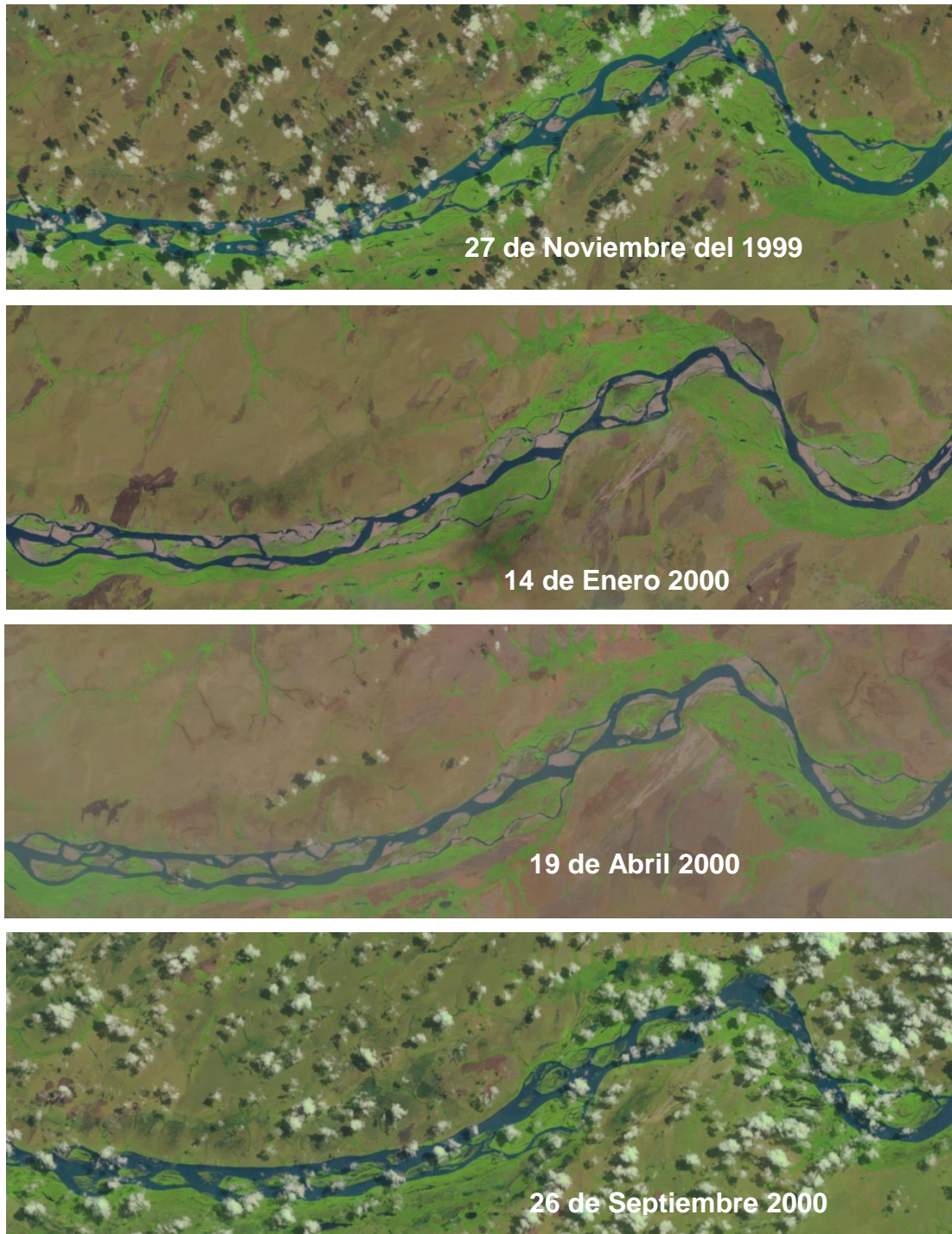


Figura 6—12 Imágenes satelitales del sector representativo de K310-K235 entre 1999-2000
Fuente: Google Earth Engine.

Con base en las revisiones anteriores de las características del río y considerando el uso de este modelo para fines de estudios de navegación se determinó que:

- La gran variabilidad en el caudal transitado hace poco conveniente el uso de matriz de rugosidad constante, por lo que se decidió utilizar la ecuación de Talmón que define la rugosidad en función de la profundidad como: $Chezy = C \cdot h^{0.17}$, siendo el parámetro de calibración el coeficiente C
- La geometría en planta del sector representativo no presenta una contracción abrupta de la sección transversal. Se descarta conceptualmente con ello los posibles efectos de la viscosidad turbulenta y se utilizara un valor de referencia para este parámetro.
- Acorde con la información sedimentológica suministrada por el IDEAM, el diámetro promedio del material de lecho ($d_{50-lecho}$) es de 0.35mm. Esta condición limita la calibración a ecuaciones de transporte de sedimentos para arena como: Engelund-Hansen, Yang y Van Rijn.

De los estudios de modelación realizados en el 2003 para el Ministerio de Transporte por parte de Hidroconsultas Ltda e INESCO S.A. en este mismo río; se pudo observar que la ecuación de Yang tenía un buen desempeño en la predicción del transporte de sedimentos. Tomando lo anterior como referencia se decidió solo utilizar para la calibración las ecuaciones de Yang y la de Van Rijn.

- Las variaciones las orillas en intervalos de tiempo inferior a 3 años dentro del sector de análisis es poco significativa. Se considera valida la suposición de islas y orillas fijas no erosionables para el período de análisis. Las islas fijas se definieron como aquellas que poseen vegetación que favorece a una mayor estabilidad. Se descartan dentro los parámetros de calibración la tasa de erosión de orillas y los coeficientes asociados a esta.
- Debido a que no se reconocieron patrones y/o fenómenos morfológicos que sugieran una mayoración o reducción de la intensidad natural del flujo helicoidal, este coeficiente fue simplificado a un valor por defecto de 1.00.

Acorde con estas consideraciones, se definió que los parámetros de calibración para este estudio serian:

- Coeficiente de Rugosidad de Chezy ($m^{0.5}/s$) en función de la profundidad: $Chezy = C \cdot h^{0.17}$, donde C es el coeficiente a calibrar.
- Ecuación de Transporte de Sedimentos (Yang para arenas o Van Rijn)

- Factor de Carga de Lecho (K_b)
- Factor de Carga en Suspensión (K_s)
- Coeficiente de Pendiente Transversal (TSC)
- Exponente de Pendiente Transversal (TSP)

6.6.5 Proceso de Calibración del Modelo del Río Meta

Para iniciar la calibración hidrodinámica fue necesaria la definición de una semilla sedimentológica y morfológica dada como:

- Ecuación de Transporte de Sedimentos: Van Rijn
- Factor de Carga de Lecho (K_b) = 0.1
- Factor de Carga en Suspensión (K_s) = 0.3
- Coeficiente de Pendiente Transversal (TSC) = 0.625
- Exponente de Pendiente Transversal (TSP) = 0.5

La calibración hidrodinámica estuvo enfocada al ajuste del coeficiente C en la ecuación de rugosidad de Chezy $= C \cdot h^{0.17}$. Se evaluaron 3 niveles de este coeficiente: 50, 55 y 60; y se comprobó el ajuste logrado por cada uno de estos casos por medio de los indicadores.

En la Figura 6—13 se presentan las gráficas de niveles de agua simulados y observados. Nótese la gran cercanía entre estas gráficas y como el cambio del coeficiente genera un desplazamiento vertical de las mismas. El mejor ajuste se presentó con un C de 55 en donde R^2 fue igual a 0.843.

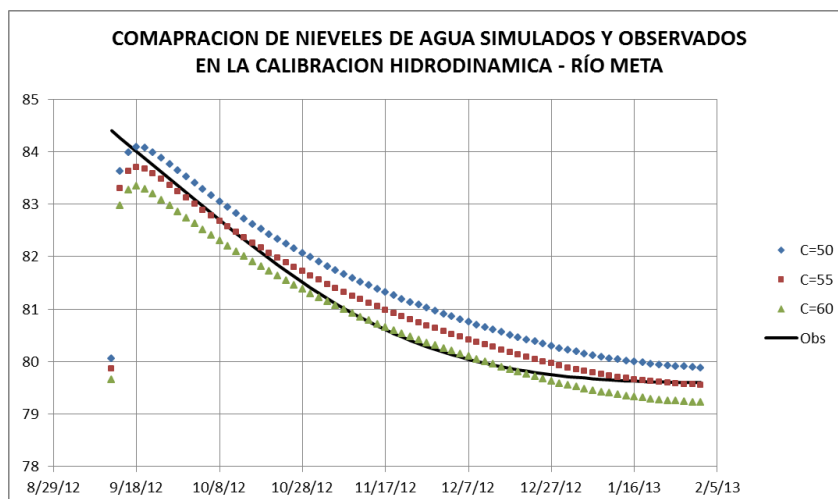


Figura 6—13 Comparación de Niveles de Agua simulados y Observados en Calibración Hidrodinámica
Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente se compararon las distribuciones de caudales en los brazos de las islas para cada caso y se observó una gran similitud entre las mismas. En la Tabla 6-4 se presentan los datos simulados y observados de este indicador. Las máximas diferencias encontradas entre los porcentajes simulados y observados para los 3 casos no superaban el 1.7%; y consecuentemente todos los coeficientes determinación obtenidos en este indicador están cercanos a 0.99 con variaciones de 0.001. Todos los casos evaluados lograron un excelente ajuste en la distribución de los caudales en los brazos de las islas.

Tabla 6-4 Distribución de Caudales en escenarios de calibración Hidrodinámica

Absc (Km)	Brazo	Obs	C=50	C=55	C=60
204	Derecho	0.7076	0.6875	0.6915	0.6962
	Izquierdo	0.2924	0.3125	0.3085	0.3038
289	Derecho	0.1598	0.1757	0.1694	0.1514
	Izquierdo	0.8402	0.8243	0.8306	0.8486
267	Derecho	0.2580	0.2718	0.2453	0.2516
	Izquierdo	0.7420	0.7282	0.7547	0.7484
248	Derecho	0.0560	0.0527	0.0436	0.0327
	Izquierdo	0.9440	0.9473	0.9564	0.9673

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 6-5 muestra los 3 niveles del coeficiente C evaluados y los respectivos indicadores. Se definió el IPA para la calibración hidrodinámica y se seleccionó el de mayor valor, el cual correspondía al del C=55.

Tabla 6-5 Coeficientes de Determinación para la Calibración Hidrodinámica

CONST.	R ²		IPA HD
	NIVEL DE AGUA (NA)	DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES ENTRE LAS ISLAS (DQ)	
50	0.7893	0.9979	0.8727
55	0.8272	0.9984	0.9062
60	0.8450	0.9981	0.8957

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se inspeccionó comportamiento de los vectores de velocidad y se observó un buen ajuste visual. Un ejemplo de las comparaciones realizadas se presenta en la Figura 4—1.

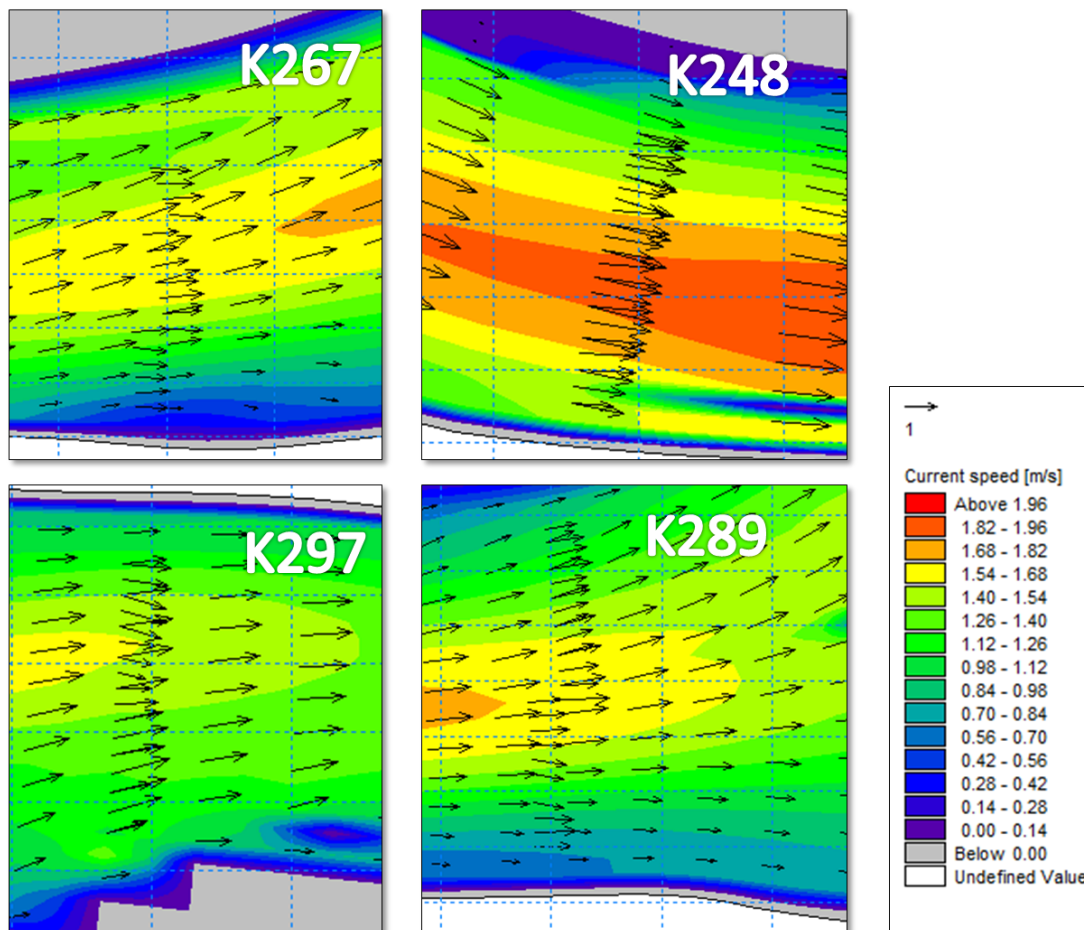


Figura 6—14 Comparación de Vectores de Velocidad en la calibración Hidrodinámica
Fuente: Elaboración Propia

Se procedió a la calibración e los componentes sedimentológicos y morfológicos por medio de 2 diseños experimentales consecutivos. El primer diseño de tipología 2^k tuvo una función de tamizaje, es decir detectar los factores estadísticamente significativos. El segundo diseño de tipología 3^k permitió establecer con mayor precisión el valor de calibración de los parámetros.

- Diseño 2^k - Diseño de Tamizaje

Los parámetros y los niveles en los cuales se evaluó el primer diseño se presentan a continuación en la Tabla 6-6. Los resultados obtenidos en cada indicador y el resultado del IPA-MF se presentan en la Tabla 6-7. Se recuerda que es este último el que se está tomando como respuesta de análisis del experimento.

Tabla 6-6 Factores (Parámetros del Modelo) de Diseño Experimental 2^k

Nivel	Ecuación de transporte de sedimentos. (a)*	Factor de carga en suspensión – ks (b)*	Factor de carga de lecho - kb (c)*	Coefficiente de pendiente transversal (d)*	Exponente de pendiente transversal (e)*
High	Yang	0.1	0.1	0.625	0.5
Low	Van Rijn	0.9	0.5	1.25	1

*Las letras en paréntesis corresponden a la nomenclatura utilizada abreviar los factores experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6-7 Resultados para cada condición Experimental – Experimento 2^k

Ecuación de Transporte (a)	Ks (b)	Kb (c)	TSC (d)	TSP (e)	NA	DQ	TSS	NL	IPA- MF
Yang	0.1	0.1	0.625	0.5	0.7383	0.9963	0.0030	0.7730	0.5420
Yang	0.1	0.5	0.625	0.5	0.7808	0.9989	0.2024	0.7955	0.6175
Yang	0.9	0.1	0.625	0.5	0.8290	0.9979	0.8236	0.8263	0.8255
Yang	0.9	0.5	0.625	0.5	0.8328	0.9978	0.4544	0.8126	0.7052
Yang	0.1	0.1	0.625	1	0.7408	0.9962	0.2037	0.7689	0.5993
Yang	0.1	0.5	0.625	1	0.7803	0.9989	0.1986	0.7984	0.6185
Yang	0.9	0.1	0.625	1	0.8297	0.9977	0.8317	0.8367	0.8352
Yang	0.9	0.5	0.625	1	0.8324	0.9973	0.4708	0.8629	0.7453
Yang	0.1	0.1	1.25	0.5	0.7386	0.9957	0.0059	0.7716	0.5419
Yang	0.1	0.5	1.25	0.5	0.7742	0.9927	0.1838	0.7583	0.5860
Yang	0.9	0.1	1.25	0.5	0.8282	0.9985	0.8188	0.8277	0.8251
Yang	0.9	0.5	1.25	0.5	0.8318	0.9963	0.4422	0.8410	0.7213
Yang	0.1	0.1	1.25	1	0.7377	0.9955	0.2091	0.7725	0.6035
Yang	0.1	0.5	1.25	1	0.7783	0.9970	0.2437	0.7765	0.6166
Yang	0.9	0.1	1.25	1	0.8291	0.9980	0.8376	0.8296	0.8320
Yang	0.9	0.5	1.25	1	0.8319	0.9976	0.4718	0.8344	0.7256
Van Rijn	0.1	0.1	0.625	0.5	0.7712	0.9983	0.7503	0.7921	0.7795
Van Rijn	0.1	0.5	0.625	0.5	0.8084	0.9970	0.6486	0.8293	0.7751
Van Rijn	0.9	0.1	0.625	0.5	0.8517	0.9950	0.7485	0.8712	0.8344
Van Rijn	0.9	0.5	0.625	0.5	0.8567	0.9506	0.7693	0.7817	0.7779
Van Rijn	0.1	0.1	0.625	1	0.7708	0.9975	0.7625	0.7916	0.7829
Van Rijn	0.1	0.5	0.625	1	0.8074	0.9992	0.5244	0.8273	0.7364
Van Rijn	0.9	0.1	0.625	1	0.8527	0.9856	0.7517	0.8704	0.8348
Van Rijn	0.9	0.5	0.625	1	0.8553	0.9646	0.7894	0.8240	0.8136
Van Rijn	0.1	0.1	1.25	0.5	0.7704	0.9978	0.7531	0.7932	0.7812
Van Rijn	0.1	0.5	1.25	0.5	0.7986	0.9987	0.5465	0.8136	0.7335
Van Rijn	0.9	0.1	1.25	0.5	0.8519	0.9919	0.7476	0.8210	0.7990
Van Rijn	0.9	0.5	1.25	0.5	0.8567	0.8903	0.7705	0.7859	0.7813

Ecuación de Transporte (a)	Ks (b)	Kb (c)	TSC (d)	TSP (e)	NA	DQ	TSS	NL	IPA- MF
Van Rijn	0.1	0.1	1.25	1	0.7697	0.9968	0.7262	0.7869	0.7687
Van Rijn	0.1	0.5	1.25	1	0.7733	0.9979	0.5785	0.8343	0.7575
Van Rijn	0.9	0.1	1.25	1	0.8530	0.9911	0.7471	0.8539	0.8219
Van Rijn	0.9	0.5	1.25	1	0.8573	0.8610	0.7796	0.8179	0.8064

Fuente: Elaboración Propia

Para determinar los factores significativos es necesario realizar un análisis de varianza (ANOVA) a los resultados. Al tratarse de un experimento sin replicas los grados de libertad del error dentro del ANOVA son muy pocos, esto podría inducir errores en la determinación de significancia de los parámetros. La prueba podría ser incapaz de detectar efectos pequeños generados por reducción de la potencia o generar resultados más significativos que los que se presentan producto de probar un número grande de efectos cada uno a un nivel de significancia del 5% (Montgomery, 2004).

Por ello, previo al desarrollo de la tabla ANOVA fue necesario evaluar cuáles de los efectos de los parámetros son verdaderos y cuales son probablemente manifestaciones justas del ruido que pueden ser interpretadas como variabilidad natural (Error). Para esta evaluación se realizó una prueba de normalidad a los efectos estandarizados de cada parámetro y sus interacciones (Véase Figura 6—15) la cual arrojó como resultado:

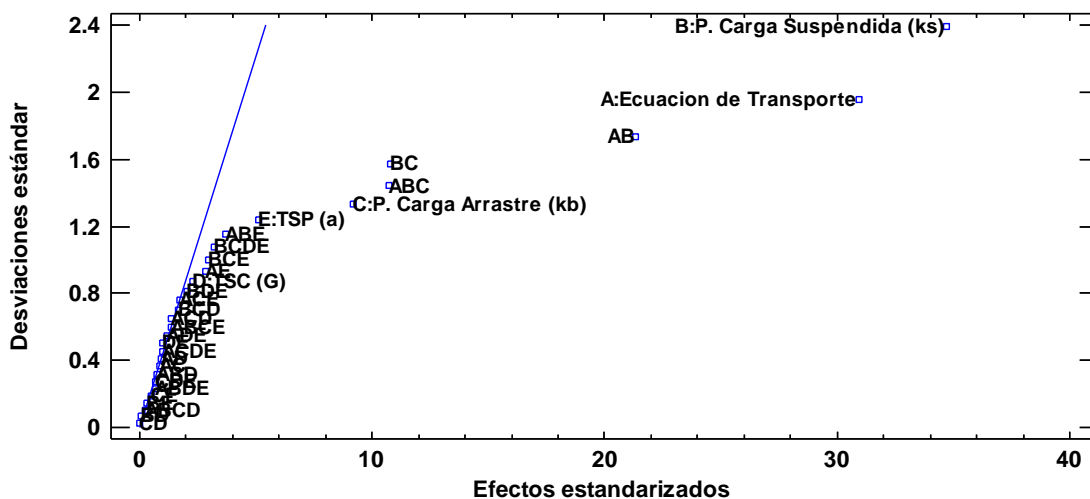


Figura 6—15 Grafica de Probabilidad Normal de Efectos para IPA-MF en diseño experimental 2^k
Fuente: Elaboración propia

Los efectos más alejados de una tendencia hacia una distribución normal fueron: B:Ks, A:Ecuacion de Transporte, AB, BC, ABC, C: Kb. Estos fueron los tomados para realizar el análisis ANOVA el cual divide la variabilidad del MF-IPA y prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

Los resultados de la tabla ANOVA mostraron que los 6 efectos evaluados tienen una Valor-P menor que 0.05 lo cual indica que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

Tabla 6-8 Tabla ANOVA - Experimento 2^k

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Transport Eq	0.0844194	1	0.0844194	245.66	0.0000
B:Ks	0.106307	1	0.106307	309.35	0.0000
C:Kb	0.00747864	1	0.00747864	21.76	0.0001
AB	0.0402854	1	0.0402854	117.23	0.0000
AC	0.0000714013	1	0.0000714013	0.21	0.6526
BC	0.0102746	1	0.0102746	29.90	0.0000
ABC	0.0101959	1	0.0101959	29.67	0.0000
Total error	0.00824752	24	0.000343647		
Total (corr.)	0.26728	31			

Fuente: Elaboración Propia

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 96.91% de la variabilidad en IPA-MF.

Se realizó la verificación de los supuestos de Normalidad, Independencia y Homocedasticidad. En la Figura 6—16 se presenta la gráfica de Normalidad de los residuos en la cual no se detecta ninguna variación significativa en el comportamiento de los mismos.

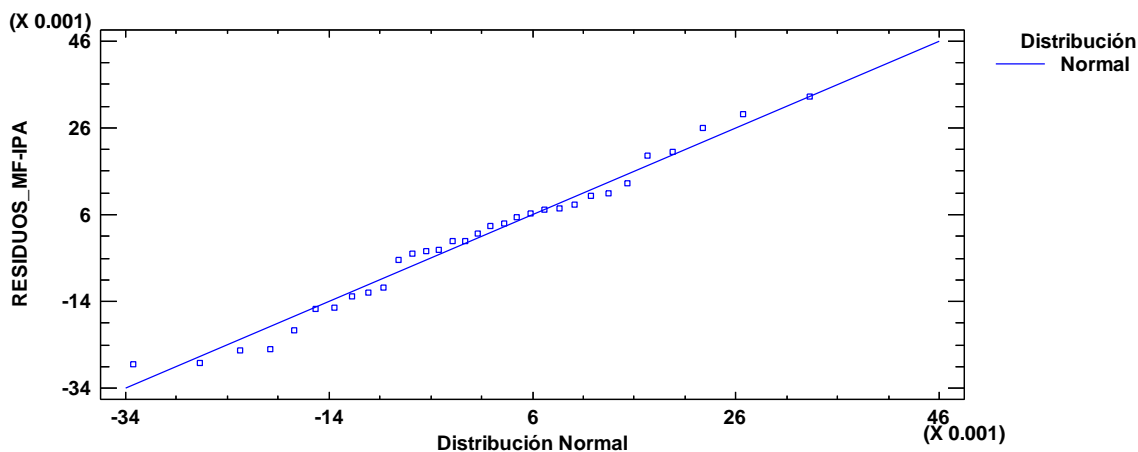


Figura 6—16 Gráfico de Probabilidad Normal de los Residuos -Experimento 2k
Fuente: Elaboración Propia

Para comprobar el supuesto de independencia se comprobó que los residuos no presentaran una tendencia con respecto al orden de ejecución. En la Figura 6—17 se presenta la gráfica de residuos para el IPA, la exhibe un comportamiento errático y disperso lo que permite concluir que no hay autocorrelación de residuos.

Además, el estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el Valor-P es de 0.2507, es decir, mayor que 0.05 (5.00%), se puede decir que no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%

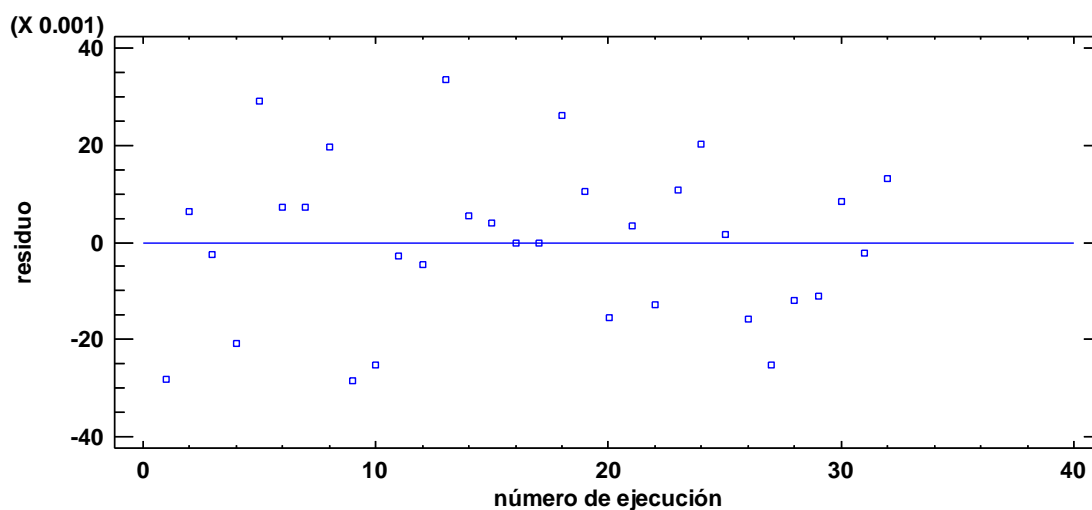


Figura 6—17 Gráfico de Residuos Vs. Orden de Ejecución para experimento 2^k
Fuente: Elaboración Propia

Por último se realiza la comprobación de la homocedasticidad en los residuos, para ellos se realiza una gráfica entre los residuos y los valores predichos. No es evidente ninguna estructura inusual.

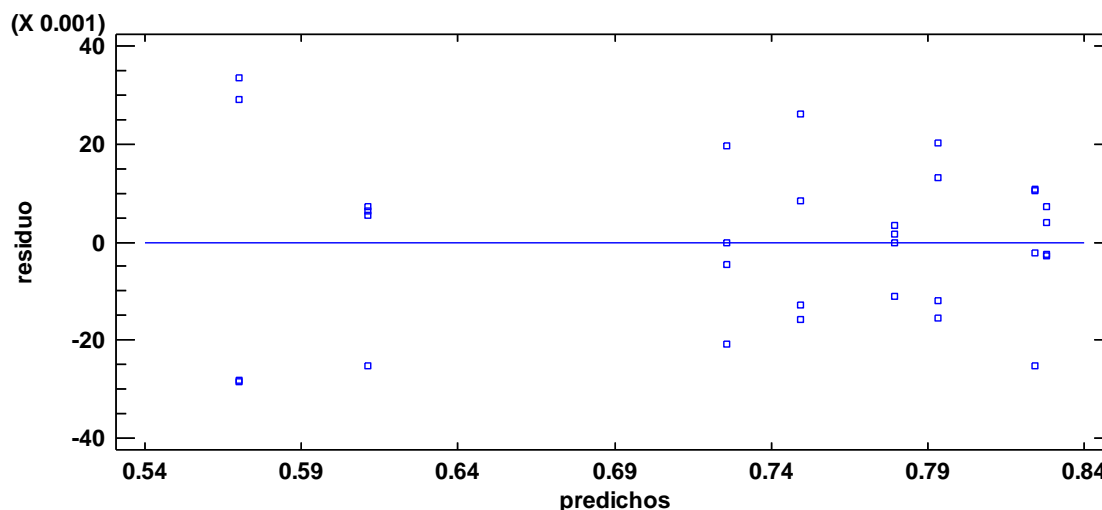


Figura 6—18 Grafico de Residuos Vs. Predicciones para experimento 2k
Fuente: Elaboración Propia

Como resultado de este experimento de tamizado se obtuvo que los 5 parámetros solo 3 de ellos y 3 de sus interacciones tengan efectos significativos sobre el IPA-MF, Solo estos 3 parámetros fueron usados para el segundo diseño de tipo 3^k o diseño de ajuste.

- Diseño 3^k : Diseño de Ajuste

Los parámetros y los niveles en los cuales se evaluó el este segundo diseño se presentan a continuación en la Tabla 6-9. Dado que las interacciones de 2do y 3er orden se reconocieron como significativas en la Tabla 6-8, estas no pueden ser obviadas en este experimento. Sin embargo, si se consideran todas las interacciones no se tendrán los grados de libertad necesarios en los residuos para calcular la tabla ANOVA. Por ello se propuso variar como generador de réplicas uno de los parámetros principales originales cuyo efecto fue reconocido como un poco significativo en la Figura 6—15.

Se eligió como factor generador de réplicas el TSP. El factor se varió entre los niveles altos (0.5) y bajo (1) definidos previamente en la Tabla 6-6.

Los resultados obtenidos en cada indicador y el resultado del IPA-MF se presentan en la Tabla 6-10. Recuerde que es este último el que se está tomando como respuesta de análisis del experimento.

Tabla 6-9 Factores (Parámetros del Modelo) de experimentación del diseño 3^k

Nivel	Ecuación de transporte de sedimentos. (a)	Factor de carga en suspensión –ks (b)	Factor de carga de lecho - kb (c)
High	Yang	0.1	0.1
Mid	-	0.5	0.3
Low	Van Rijn	0.9	0.5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6-10 Resultado de Experimento 3^k

Ecuación de transporte de sedimentos (a)	Factor de carga en suspensión –ks (b)	Factor de carga de lecho - kb (c)	IPA-MF
Van Rijn	0.1	0.1	0.7795
Van Rijn	0.1	0.1	0.7687
Van Rijn	0.1	0.3	0.7729
Van Rijn	0.1	0.3	0.7306
Van Rijn	0.1	0.5	0.7751
Van Rijn	0.1	0.5	0.7575
Van Rijn	0.5	0.1	0.8614
Van Rijn	0.5	0.1	0.8665
Van Rijn	0.5	0.3	0.7692
Van Rijn	0.5	0.3	0.7941
Van Rijn	0.5	0.5	0.8314
Van Rijn	0.5	0.5	0.8299
Van Rijn	0.9	0.1	0.8344
Van Rijn	0.9	0.1	0.8219
Van Rijn	0.9	0.3	0.7621
Van Rijn	0.9	0.3	0.7452
Van Rijn	0.9	0.5	0.7779
Van Rijn	0.9	0.5	0.8064
Yang	0.1	0.1	0.5420
Yang	0.1	0.1	0.6035
Yang	0.1	0.3	0.5931

Ecuación de transporte de sedimentos (a)	Factor de carga en suspensión -ks (b)	Factor de carga de lecho - kb (c)	IPA-MF
Yang	0.1	0.3	0.5948
Yang	0.1	0.5	0.6175
Yang	0.1	0.5	0.6166
Yang	0.5	0.1	0.7632
Yang	0.5	0.1	0.7681
Yang	0.5	0.3	0.7745
Yang	0.5	0.3	0.7713
Yang	0.5	0.5	0.5701
Yang	0.5	0.5	0.5957
Yang	0.9	0.1	0.8255
Yang	0.9	0.1	0.8320
Yang	0.9	0.3	0.7297
Yang	0.9	0.3	0.7270
Yang	0.9	0.5	0.7052
Yang	0.9	0.5	0.7256

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del Análisis de varianza (ANOVA) de este experimento se presentan en la Tabla 6-11:

Tabla 6-11 Tabla ANOVA experimento 3^k

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Ec	0.103394	1	0.103394	91.53	0
B:Ks	0.0666866	2	0.0333433	29.52	0
C:Kb	0.0196977	2	0.00984885	8.72	0.0016
AB	0.0281542	2	0.0140771	12.46	0.0002
BC	0.0134977	2	0.00674886	5.97	0.0085
ABC	0.0231324	4	0.00578311	5.12	0.0045
Error total	0.0248521	22	0.00112964		
Total (corr.)	0.279415	35			

*Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Fuente: Elaboración Propia

De este experimento de ajuste se obtuvo todos los factores y las interacciones son significativas. Todos los valores-P de la tabla ANOVA son menores que 0.05, los

que quiere decir que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre IPA-MF con un 95.0% de nivel de confianza.

El modelo estadístico encontrado por medio del ANOVA permite explicar un 97.69% la variabilidad de los datos del IPA-MF. Para poder estudiar los efectos de los parámetros y realizar maximización del IPA-MF; se realizó la verificación de los supuestos de Normalidad, Independencia y Homocedasticidad.

En la Figura 6—19 se presenta la gráfica de Normalidad de los residuos en la cual no se detecta ninguna variación significativa en el comportamiento de los mismos. Se realizó además la prueba de normalidad de Chi-Cuadrado en la cual se dividen los residuos de IPA-MF en 16 clases igualmente probables y se comparan el número de observaciones en cada clase con el número esperado de observaciones. Esta comparación realizada con ayuda de Statgraphics permitió obtener Valor-P de 0.9273 el cual es mayor o igual a 0.05 lo que impide rechazar la idea de que residuos de IPA-MF no provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

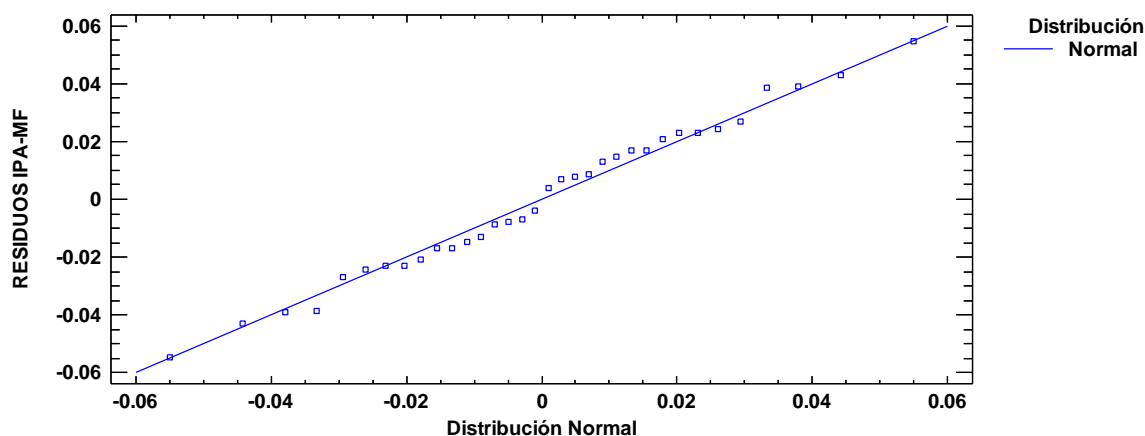


Figura 6—19 Grafica de Probabilidad Normal de los Residuos diseño experimental 3k
Fuente: Elaboración Propia

El supuesto de independencia se comprobó con la gráfica de residuos Vs. Orden de ejecución de la cual se pudo observar que los residuos no presentaran una tendencia con respecto al orden de ejecución. En la Figura 6—20 presenta un comportamiento errático y disperso lo que permite concluir que no hay autocorrelación de residuos.

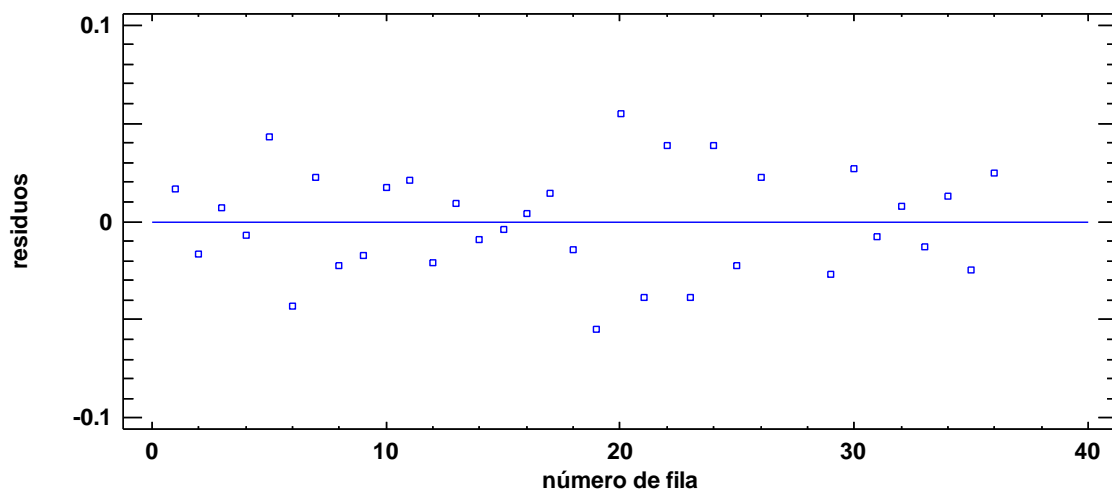


Figura 6—20 Grafica de Residuos Vs. Orden de Ejecución para diseño experimental 3k
Fuente: Elaboración Propia

Por último se realiza la comprobación de la homocedasticidad en los residuos, para ellos se realiza una gráfica entre los residuos y los valores predichos. No es evidente ninguna estructura inusual.

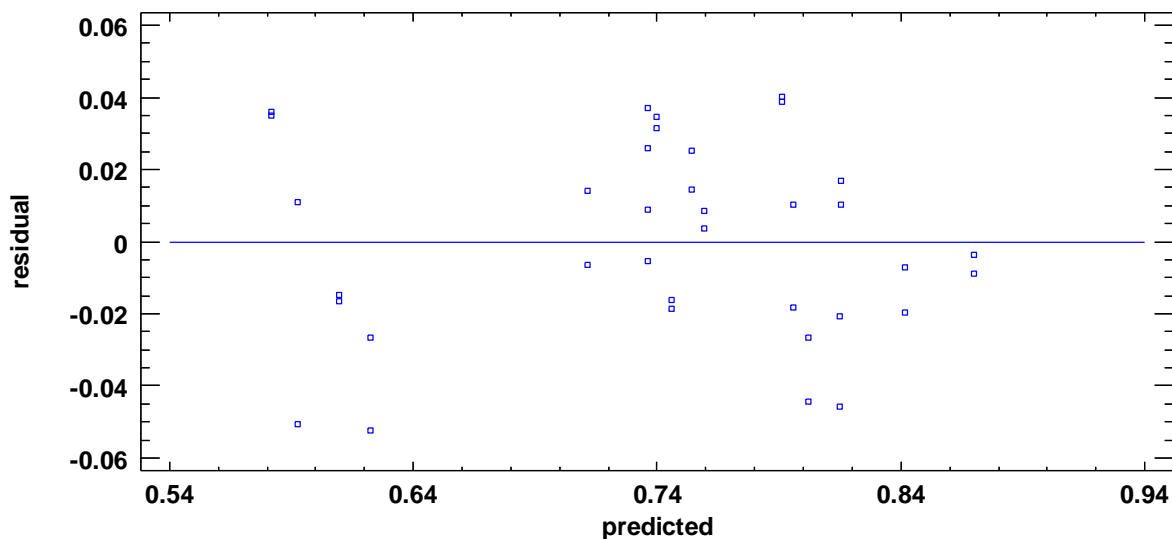


Figura 6—21 Grafico de Residuos Vs. Predicciones para experimento 3k
Fuente: Elaboración Propia

Para determinar el punto óptimo de operación se analizó el comportamiento de los parámetros principales y de este se pudo observar que los mejores ajustes los eran conseguidos con la ecuación de Transporte de Van Rijn (Véase Figura 6—22). Se observó que el IPA-MF se incrementaba al ascender el Ks y al disminuir el

Kb. Se determinó las medias del IPA –MF cuando los niveles de Ks se encuentran entre 0.90 y 0.50 son estadísticamente iguales; y que las medias del IPA-MF cuando se encuentra entre 0.30 y 0.10 también lo son.

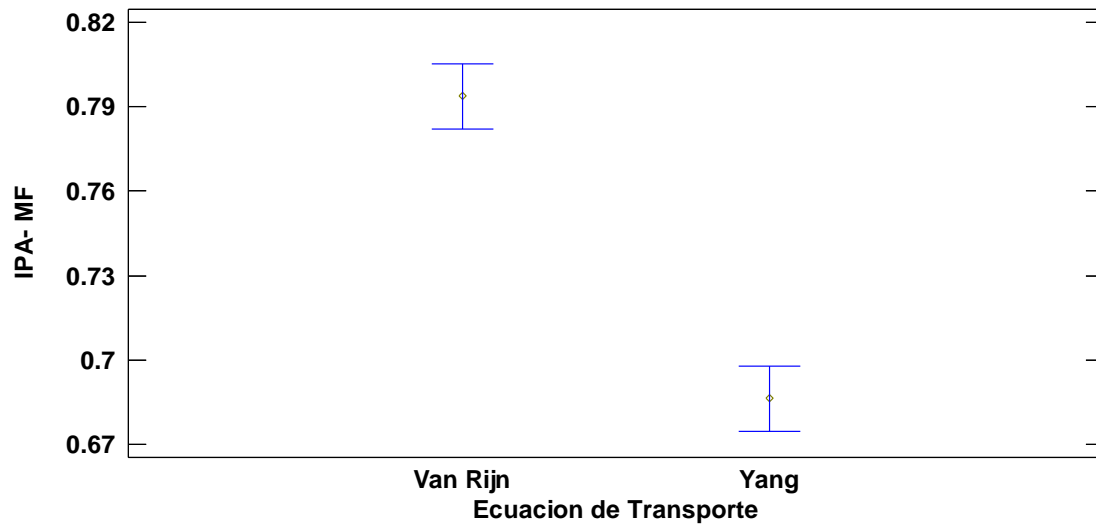


Figura 6—22 Comparación estadística de las Medias para el facto: Ecuación de Transporte
Fuente: Elaboración Propia

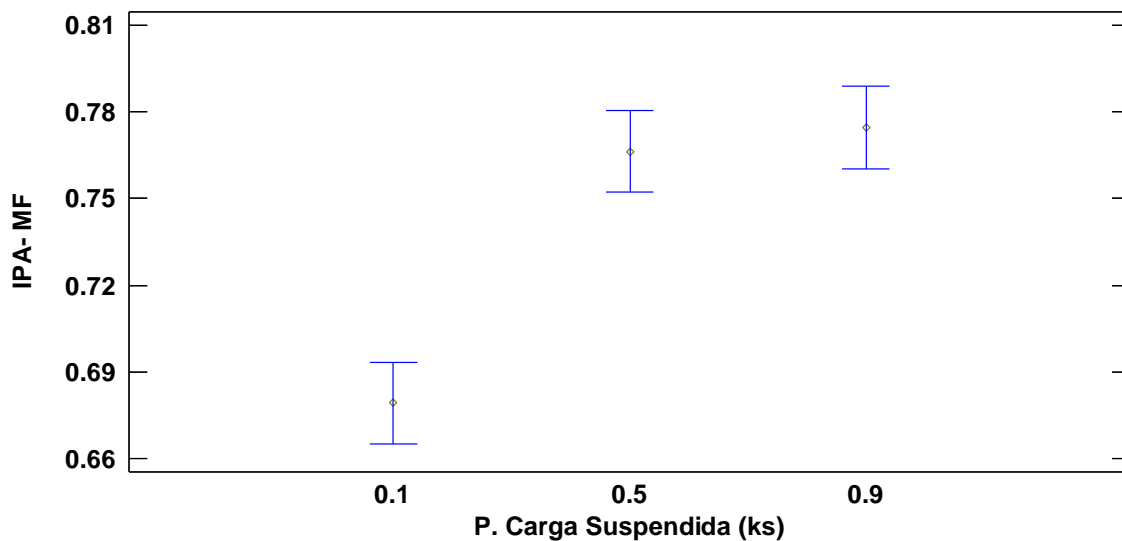


Figura 6—23 Comparación estadística de las Medias para el facto: P Carga Suspendida
Fuente: Elaboración Propia

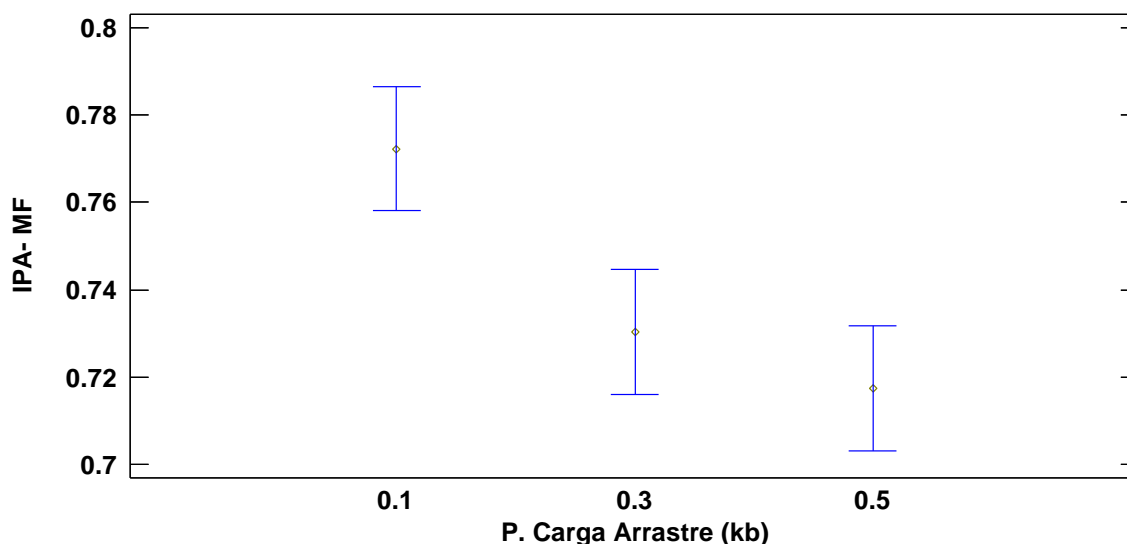


Figura 6—24 Comparación estadística de las Medias para el facto: P Carga Arrastre
Fuente: Elaboración Propia

Del mismo modo, se estudió el comportamiento de las interacciones de segundo orden: AB, AC y BC. Para el caso de la Interacción AB, pudo corroborarse que el IPA-MF aumenta cuando se implementó la ecuación de Transporte de Van Rijn. Su máximo valor se encuentra cuando Ks es igual en 0.50; aunque una vez más se reconoce que este nivel es estadísticamente igual a 0.90.

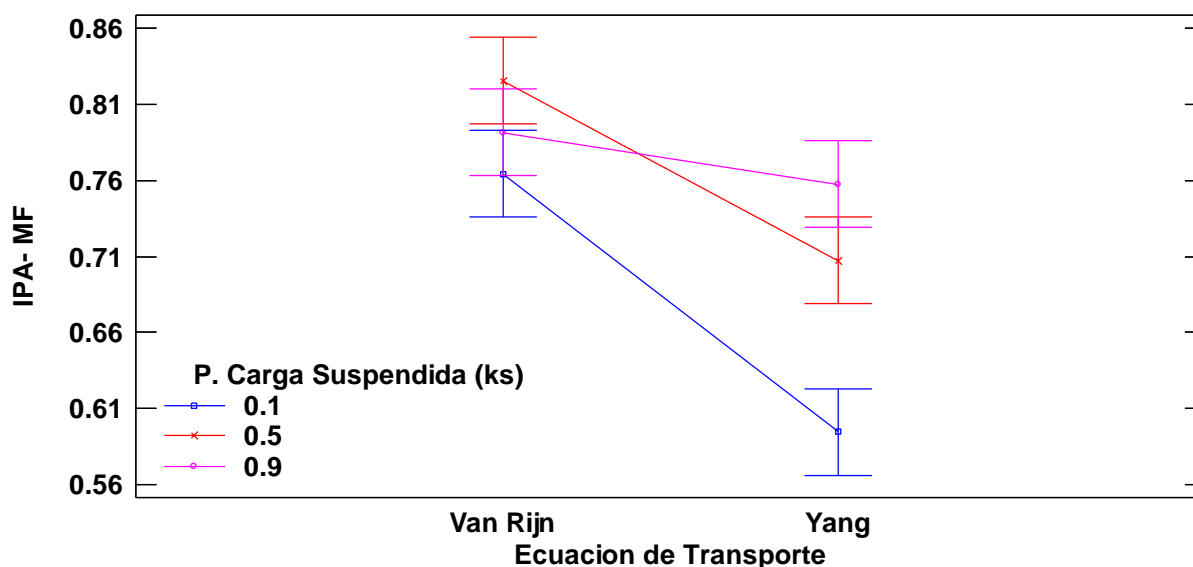


Figura 6—25 Comparación estadística de las Medias para las interacciones Ecuación Transporte y
P carga Suspendida (ks)
Fuente: Elaboración Propia

Del análisis de la interacción AC se pudo corroborar una vez más que el IPA-MF aumenta cuando se implementa la ecuación de Van Rijn y que alcanza sus máximos valores cuando K_b es igual a 0.10. Sin embargo, es posible reconocer de los intervalos de Confianza la existencia de una similitud estadística entre los tres niveles de este último parámetro cuando se implementa la ecuación de Van Rijn.

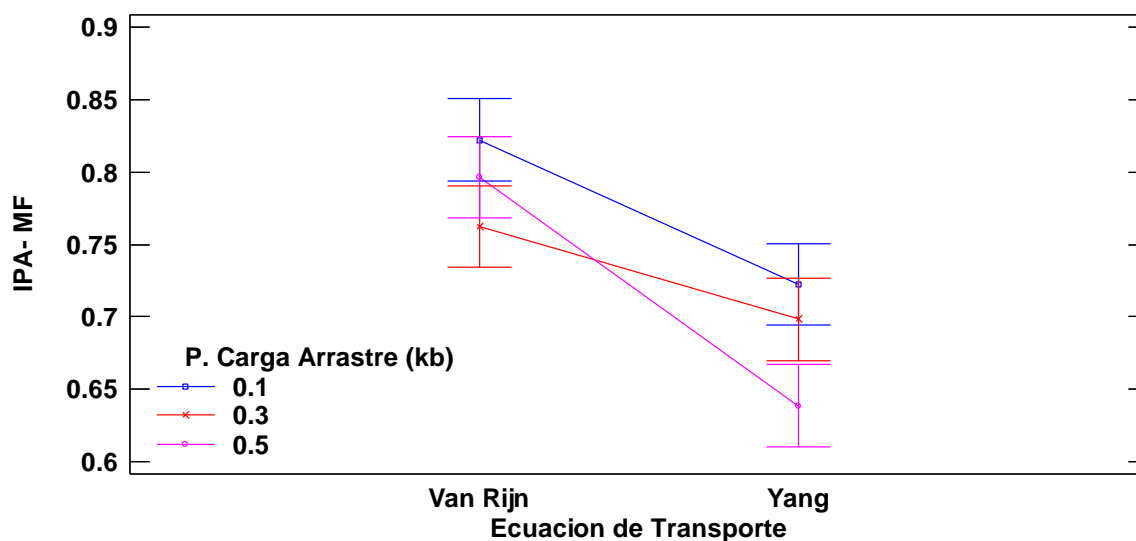


Figura 6—26 Comparación estadística de las Medias para las interacciones Ecuación Transporte y P carga Arrastre (kb)

Fuente: Elaboración Propia

Análogamente se examinó el comportamiento de la interacción BC. Se pudo observar que los valores aumentan cuando K_s alcanza 0.90 y K_b es 0.10; aunque existe una similitud estadística en las medias del IPA-MF cuando K_s está entre 0.90 y 0.50.

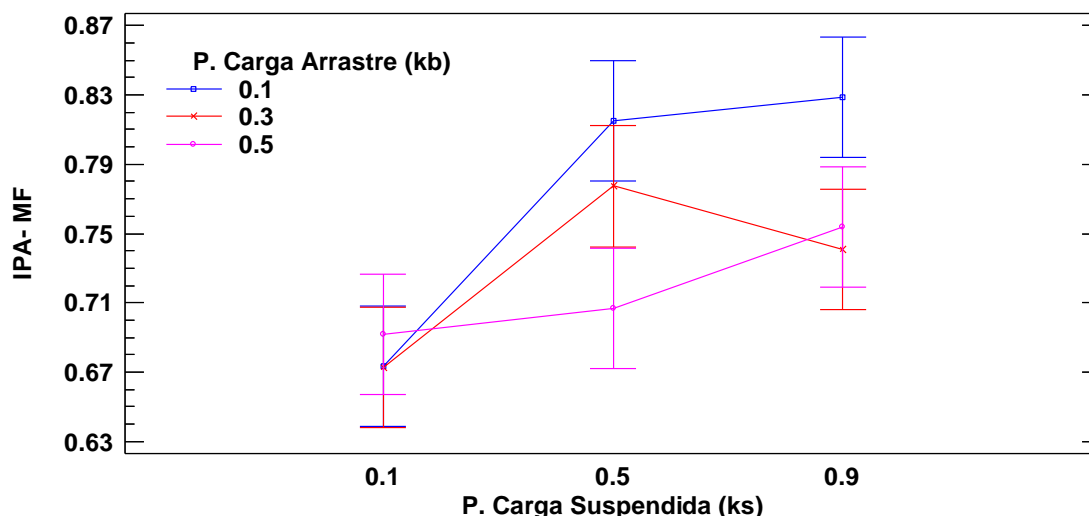


Figura 6—27 Comparación estadística de las Medias para las interacciones P carga Arrastre (kb) y P carga Suspendida (ks)
Fuente: Elaboración Propia

Una vez entendido el comportamiento del modelo experimental se la optimización de la calibración tomando como objetivo maximizar el IPA-MF dentro de la región de experimentación. El mejor resultado de IPA-MF encontrado fue de 0.8639 asociado a la condición experimental: Ecuación de transporte de Van Rijn, $K_s=0.5$ y un $K_b=0.10$.

Se verificaron el ajuste de los niveles de agua (NA) y la distribución de caudales (DQ) para el caso de optimización y se obtuvo un IPA-HD de 0.90. Asimismo se evaluaron los parámetros cualitativos asociados a la distribución de caudales en las islas y la evolución morfológica para el caso de optimización.

En la Figura 6—28 se presentan la comparación de los vectores de velocidad. En esta se puede observar que coinciden aproximadamente en magnitud y dirección.

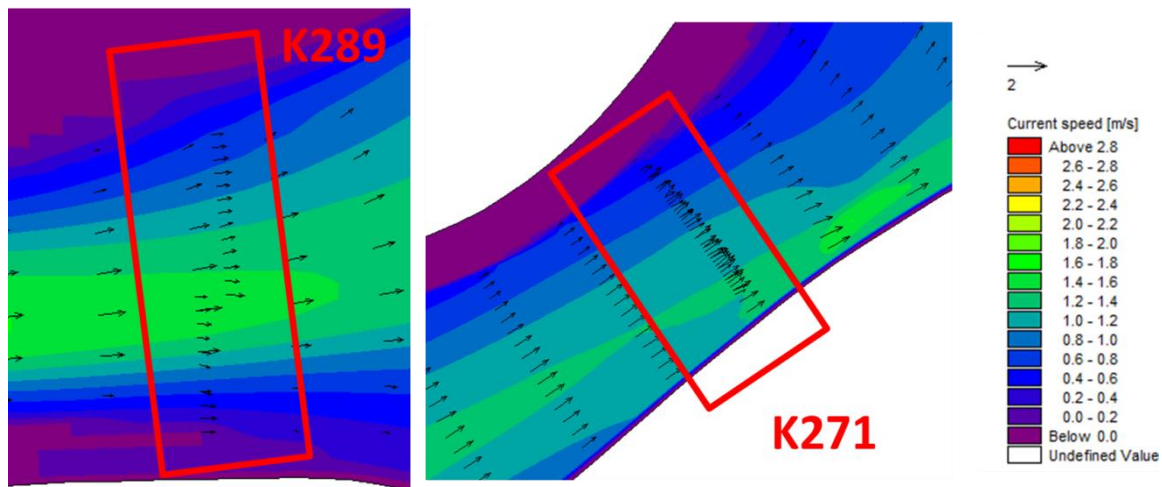


Figura 6—28 Comparación de los Vectores de Velocidad para el caso seleccionado
Fuente: Elaboración Propia

Se corrobora la evolución morfológica y no se presentaron inestabilidades o cambios bruscos de batimetría significativos. En las Figura 6—29 a Figura 6—33 se presentan las condiciones de Profundidad y Nivel del Lecho en diferentes pasos de tiempo durante la corrida del modelo.

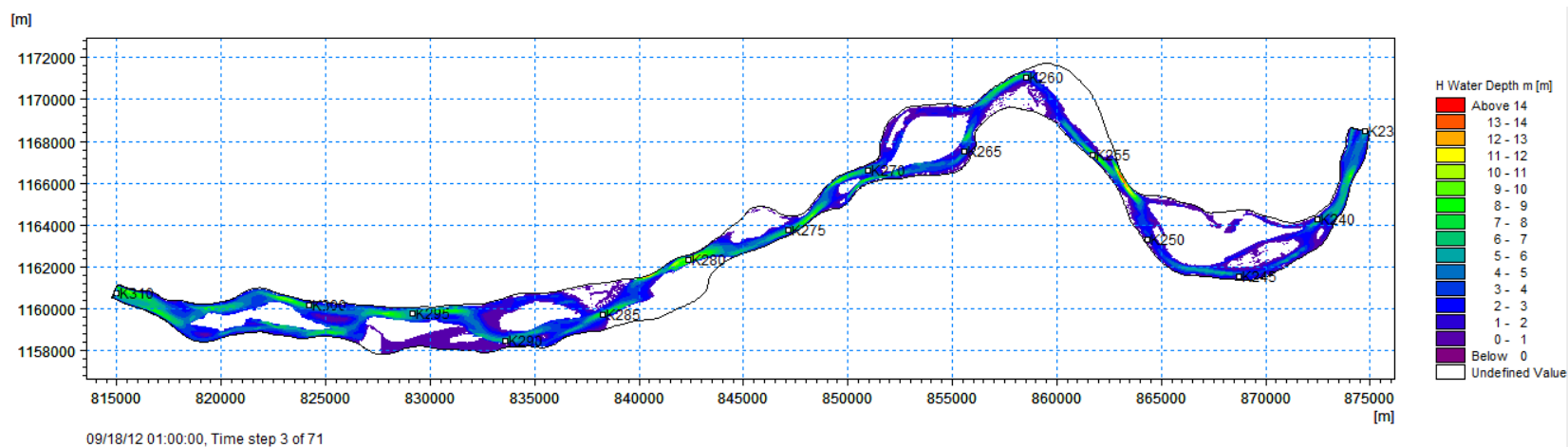


Figura 6—29 Mapa de profundidades para después de 3 semanas de simulación
Fuente: Elaboración Propia

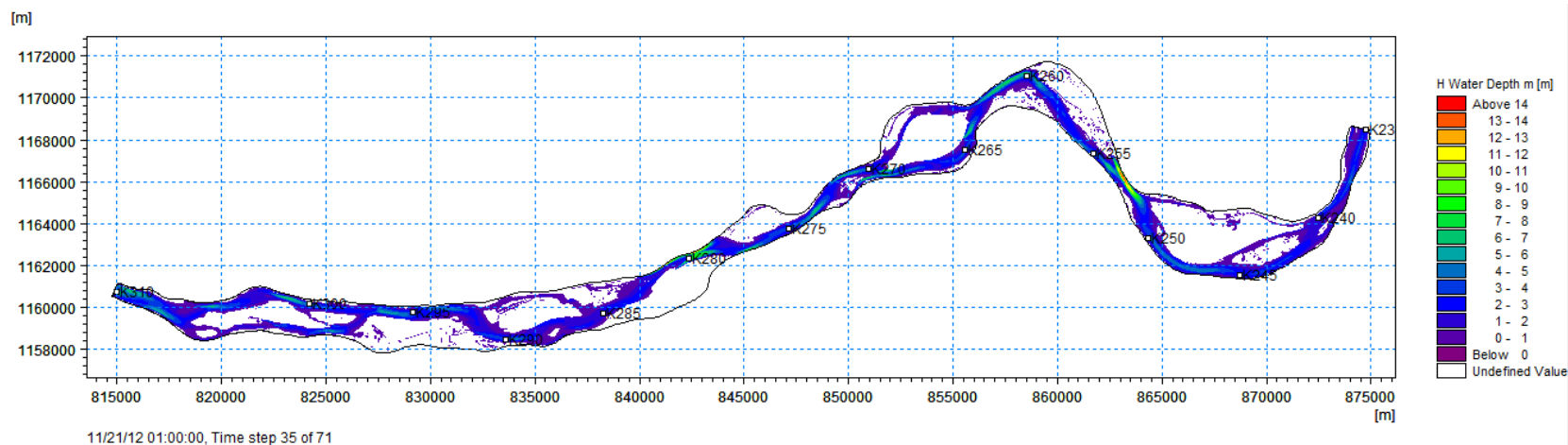


Figura 6—30 Mapa de profundidades para después de 31 semanas de simulación
Fuente: Elaboración Propia

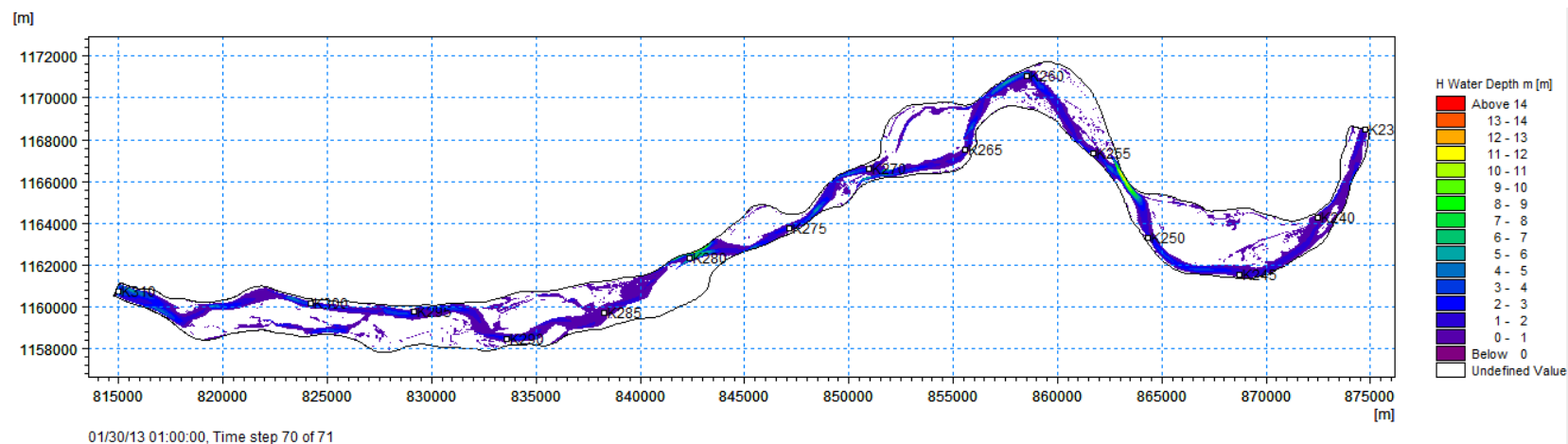


Figura 6—31 Mapa de profundidades para después de 70 semanas de simulación
Fuente: Elaboración Propia

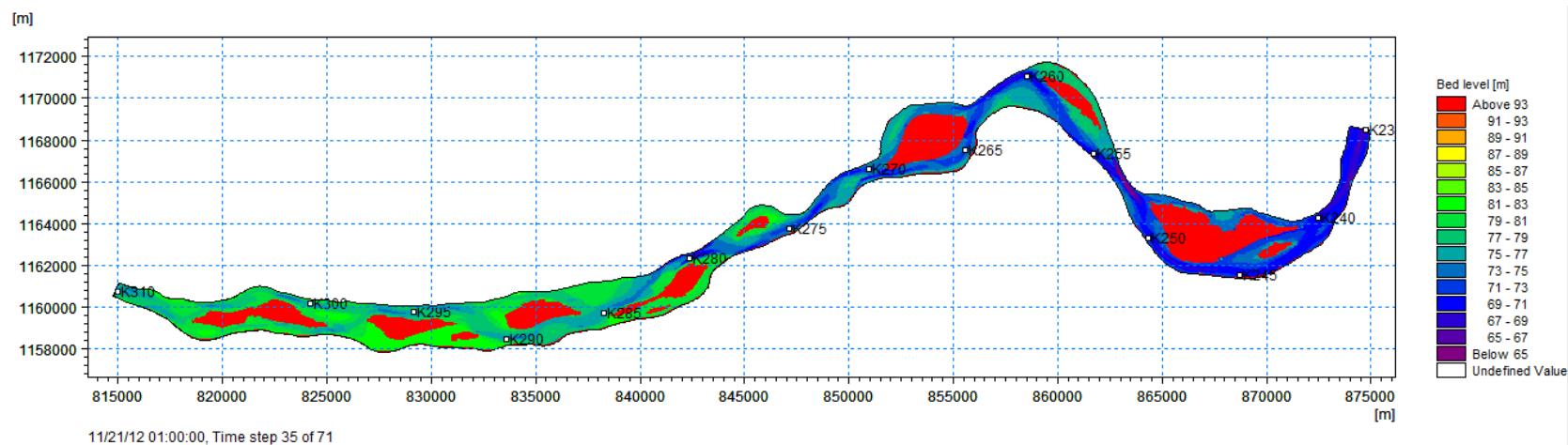


Figura 6—32 Mapa de niveles del lecho después de 35 Semanas de simulación
Fuente: Elaboración Propia

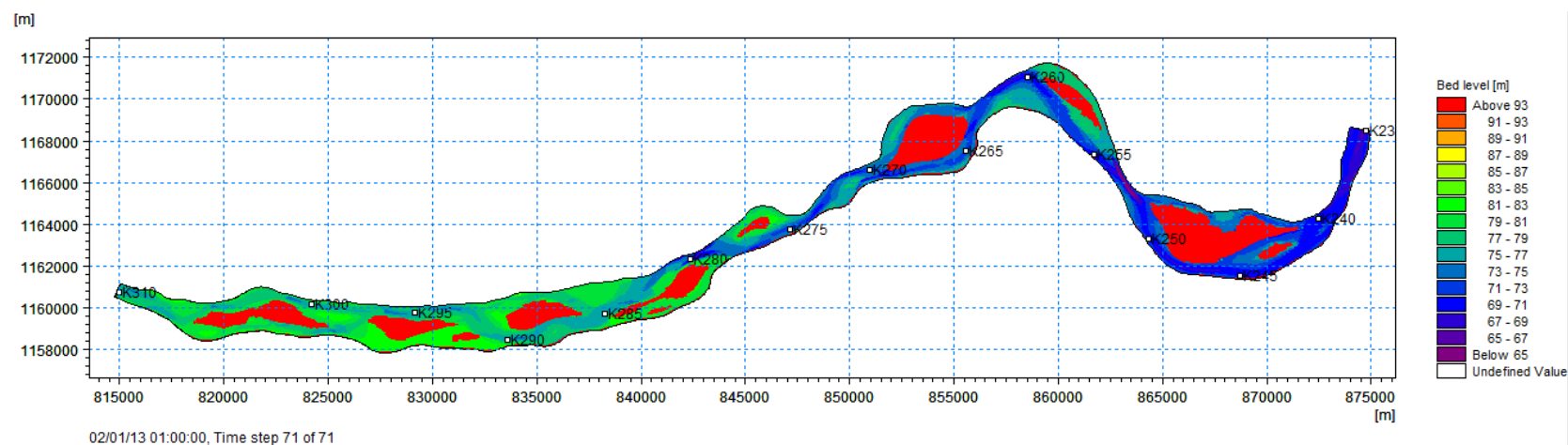


Figura 6—33 Mapa de niveles del lecho después de 71 Semanas de simulación
Fuente: Elaboración Propia

Producto de esta verificación de los parámetros cualitativo se concluye que el mejor ajuste de calibración para el modelo del río Meta evaluado fue dado en la condición experimental: Ecuación de transporte de Van Rijn, $K_s=0.5$ y un $K_b=0.1$; obteniendo un IPA-MF encontrado fue de 0.8639 y un IPA (global) de 0.8819

7 CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación se logró desarrollar una metodología de calibración de modelos hidromorfológicos que es capaz de lograr el ajuste de los parámetros por medio de una estructura secuencial y estructurada. La metodología, la cual está basada en un diseño experimental permitió optimizar el ajuste con el mínimo esfuerzo computacional.

Como parte del desarrollo de la metodología, fue posible definir algunos criterios de criterios de simplificación de los parámetros de calibración seleccionados; y definir indicadores de ajuste capaces de medir la respuesta del modelo a la variabilidad de los parámetros de calibración.

La metodología se aplicó exitosamente al caso de estudio del río Meta, Colombia. En este caso los parámetros de calibración fueron: el coeficiente de rugosidad (Chezy), la ecuación de transporte de sedimentos, • Factor de Carga de Lecho (K_b), Factor de Carga en Suspensión (K_s), Coeficiente de Pendiente Transversal (TSC) y Exponente de Pendiente Transversal (TSP). Como resultado de este proceso se obtuvo que las variaciones realizadas al Coeficiente de Pendiente Transversal (TSC) y Exponente de Pendiente Transversal (TSP) no fueran estadísticamente significativas para la calibración del modelo. El punto óptimo encontrado para el modelo fue conseguido utilizando un C para el coeficiente de Chezy de 55, la ecuación de transporte de Van Rijn, un $K_s=0.50$ y un $K_b=0.10$. El un Indicador Global de Ajuste (IPA) de 0.8819, el cual es valor satisfactorio para los requerimientos y aplicaciones.

Aunque los planteamientos y los parámetros de calibración descritos en la investigación están asociados a MIKE21C se espera que la metodología pudiese ser aplicable a otros modelos numéricos hidromorfológicos.

Se espera que ahora que se tiene una estructura metodológica sólida se puedan proponer algoritmos de optimización que procesen los resultados de forma más rápida y automática de manera que se reduzcan el tiempo de calibración.

8 BIBLIOGRAFÍA

- L. Schmied, & R. Cañizares. (2009). Design of River Training Structures Using Morphological Modeling in the Magdalena River, Colombia. *Estuarine and Coastal Modeling*, 566-581.
- Warren, I., & Bach, H. (1992). MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *3rd International Software Exhibition for Environmental Science and Engineering*, 7, págs. 229–240.
- Brière, C., Giardino, A., & Van der Werf, J. (2010). MORPHOLOGICAL MODELING OF BAR DYNAMICS WITH DELFT3D: THE QUEST FOR OPTIMAL FREE PARAMETER SETTINGS USING AN AUTOMATIC CALIBRATION TECHNIQUE. *COASTAL ENGINEERING 2010*, 1-12.
- Cormagdalena - Universidad del Norte. (2005). *Estudio Geológico Geomorfológico y Susceptibilidad a Inundaciones entre Puente Pumarejo y Bocas De Ceniza, a partir de Sensores Remotos*. Barranquilla.
- CORMAGDALENA, Uninorte. (2000). *Estudio de Navegabilidad del Río Magdalena entre La Gloria (K460) - Puente Pumarejo (K1) Canal del Dique*. Informe Final, Barranquilla.
- DHI . (2011). *mikebydhi.com*. Recuperado el 14 de 10 de 2013, de <http://mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKE21C.aspx>
- DHI. (2004). MIKE 21C RIVER MORPHOLOGY . DHI Water & Environment.
- DHI. (June de 2005). *USER GUIDE: MIKE 21C RIVER HIDRODYNAMICS & MORPHOLOGY*. Hørsholm, Dinamarca: DHI Water & Environment.
- DHI. (2011). *MIKEBYDHI*. (DHI) Recuperado el 11 de 03 de 2014, de <http://mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKE21C.aspx>
- Dorfmann, C., & Knoblauch, H. (2008). ADCP measurements in a reservoir of a run-of-river Hydro Power Plant. *6th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*.
- Ettema, R., Arndt, R., Roberts, P., & Wahl, T. (2000). *Hydraulic Modeling: Concepts and Practice (Asce Manual and Reports on Engineering Practice)*. .: Enviromental and Water Resources Institute of American Society of Civil Engineers (ASCE).

- Fundación Universidad del Norte. (2014). *"Evaluación condicines de Dinámica Fluvial por obras de Vertimientos y Captación de aguas de la Triple A S.A. E.S.P. en el Río Magdalena" Captación de agua arroyo del Country*. Triple A de Barranquilla S.A. E.S.P, Barranquilla.
- Giardino, A., Brière, C., & Van der Werf, J. (2011). *Morphological modelling of bar dynamics with Delft3D: The quest for optimal parameter settings*. Deltares.
- Guerrero, M., & Lamberti, A. (2013). Bed-roughness investigation for a 2-D model calibration: the San Martín case study at Lower Paranà. *International Journal of Sediment Research*, 458-469.
- Janssen, P., Elzinga, T., Tomas, M., & M. C. (2004). Improvement of Navigation on the Danube River. *Ports '01* , 1-10.
- Julien, P. Y. (2002). *River Mechanics*.
- Ministerio de Transporte. (2005). *Caracterización del Transporte en Colombia Diagnostico y Proyectos de Transporte e Infraestructura*. Bogota: Ministerio de Transporte.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Ánlisis de Experimentos* . Mexico D.F.: Grupo Noriega.
- Nanda, S., & Ports, M. (s.f.). Snag Boat to Satellites: A histroy of upper Misissippi River Navigation System.
- Novak, P., Moffat, A., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2001). *Hydraulic Structures*. Bogota: McGrawHill.
- Olsen, N. (2012). *Numerical Modelling and Hydraulics* (3rd ed.). Trondheim: Department of Hydraulic and Enviromental Engineering The Norwegain University of Science and Technology.
- Papanicolaou, A., Elhakeem, M., Krallis, G., & Edinger, J. (2008). Sediment Transport Modeling Review-Curent and Fure Developments. *Journal Hydraulic*, 1-14.
- Papanicolaou, A., Elhakeem, M., Krallis, G., Prakash, S., & Edinger, J. (2008). Sediment Transport Modeling Review—Current and Future Developments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1-14.
- Powell, M. (2014). *Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research*.

- Remo, J., Khanal, A., & Pinter, N. (2013). Assessment of chevron dikes for the enhancement of physical-aquatic habitat within the Middle Mississippi River, USA. *Journal of Hydrology*, 146-162.
- Shafiquil Islam, A. (Febrero de 2009). GRAVEL TRANSPORT AND MORPHOLOGICAL MODELING FOR THE LOWER FRASER RIVER, BRITISH COLUMBIA. A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN THE FACULTY OF GRADUATE STUDIES (CIVIL ENGINEERING) . VANCUEVER: THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA.
- Talmon, A. (1992). Bed topography of river bends with suspended sediment transport. Delft University of Tech. .
- Thorne, C. R., Hey, R. D., & Newson, D. M. (1997). *Applied Fluvial Geomorphology for river Engineering And Management*. Chichester: Wiley.
- Universidad del Norte. (2013). *ACTUALIZACIÓN DE LOS ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA LA NAVEGABILIDAD DEL RIO META ENTRE CABUYARO (K804) Y PUERTO CARREÑO (K0)*. Barranquilla.
- Universidad del Norte. (2013). *ACTUALIZACIÓN DE LOS ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA NAVEGABILIDAD DEL RIO META* . Barranquilla: Universidad del Norte.
- Vidal , J., Moisan, S., Faure, J.-B., & Dartus, D. (2005). Towards a reasoned 1D river model calibration. *Journal of Hydroinformatics*, 91-104.
- Vidal, J.-P., Moisan, S., Faure, J.-B., & Dartus, D. (11 de 2007). River model calibration, from guidelines to operational support tools. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1628-1640.
- Weiming , W. (2008). *Computacional River Dynamics* . Lodon: Taylor & Francis.